

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PAREDES DE TA- BIQUE À COMPRESSÃO E CORTE NO PLANO

GONÇALO ROCHA MAIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAção EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes

Coorientador: Professor Doutor José Avelino Loureiro Moreira Padrão

JUNHO 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e amigos,

Se todos ajudarem a segurar o céu, nenhum indivíduo se cansa.

Ashkari Johnson Hodari

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes, por toda a disponibilidade demonstrada, pelo conhecimento transmitido sempre com o maior entusiasmo e por toda a ajuda prestada na realização da dissertação.

Ao professor José Avelino Loureiro Moreira Padrão, pela sua disponibilidade, ajuda prestada e partilha de conhecimentos no que toca aos ensaios laboratoriais.

À minha família, que tornou possível a conclusão desta etapa da minha vida, que demonstrou o seu apoio incondicional e me deu a liberdade para fazer as minhas próprias escolhas para o futuro.

Por fim e um dos mais importantes, aos meu amigos e colegas, por fazerem parte da minha vida nesta caminhada e a tornarem mais fácil. Obrigado por todos os momentos vividos e partilhado, todos os conselhos e por estarem sempre presentes. Sem sombra de dúvida que sem eles esta etapa não teria sido a mesma.

RESUMO

O tabique é uma técnica construtiva muito presente nas construções em Portugal, com mais representatividade nas regiões de Trás-os-Montes e Alto Douro. Com o aumento do número de obras de reabilitação do edificado e com a falta de informação acerca deste elemento estrutural advém a necessidade do seu estudo e caracterização de forma a se poder intervir da melhor maneira neste tipo de estrutura.

Este trabalho teve como objetivo, numa primeira parte, o ensaio e análise do comportamento de 4 paredes de tabique retiradas de um edifício em Viseu. A disponibilização das paredes para esta campanha de ensaios foi bastante importante uma vez que estas foram retiradas de um edifício alvo de reabilitação/demolição. Isto permitiu fazer uma melhor caracterização das paredes, no âmbito da reabilitação, depois de estas serem sujeitas a esforços reais. As paredes foram ensaiadas para forças de compressão e de corte, dentro de vários cenários. Estes cenários consistiram em vários estados das paredes: inicialmente em paredes rebocadas, posteriormente em paredes sem reboco, e foi ainda ensaiada uma parede com uma cantoneira na base, com o objetivo de estudar o efeito deste tipo de reforço.

Numa segunda e última fase deste trabalho, foram realizados modelos numéricos de duas destas paredes num software de cálculo automático, SAP2000, com o intuito de comparar o seu comportamento no modelo numérico com o comportamento observado no ensaio.

Palavras-Chave: Estruturas de madeira, comportamento experimental, simulação numérica.

Abstract

Tabique is a constructive technique very present in Portuguese construction, with more representation on the Trás-os-Montes and Alto Douro regions. With the increasing number of rehabilitation works on the already built and the lack of information about this structural element, comes the necessity of its study and characterization to intervene in a better way on this kind of structure.

The present work had as objective, firstly, the test and analysis of 4 tabique walls behavior, removed from a building in Viseu. The availability of this walls was very important for the conducting of the tests as they were removed from a rehabilitated building. This has allowed a better characterization of the walls, in scope of rehabilitation, after being subject to real efforts. The walls were tested to compression and cut forces, on several scenarios. The different scenarios were: firstly plastered, secondly without plaster and one of them was tested with a metallic profile at its base in order to study the effect of that kind of reinforcement.

At a second and last phase of this work, numerical models were performed on 2 of this walls using an automatic calculation software, SAP2000, in order to compare its performance in the automatic software with its behavior observed during the tests.

Keywords: Wooden structures, experimental behavior, numerical simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
1 Introdução	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2. METODOLOGIA	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2 Enquadramento Das Paredes De Tabique	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. REABILITAÇÃO	3
2.2.1. PRINCÍPIOS DA REABILITAÇÃO	4
2.2.2. PROCESSO DA REABILITAÇÃO.....	4
2.3. ESTRUTURAS EM MADEIRA.....	5
2.3.1. MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL.....	5
2.3.2. CONSERVAÇÃO DA MADEIRA	7
2.3.2.1. Classe de Exposição.....	7
2.3.2.2. Ataque Fúngico	8
2.3.2.3. Ataque de Insetos	8
2.3.3. INTERVENÇÃO DE CONSERVAÇÃO	9
2.3.3.1. Prevenção	10
2.4. TABIQUE	11
3 Paredes em Estudo	15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. CARATERIZAÇÃO DAS PAREDES	15
3.2.1. PAREDE 1.....	15
3.2.2. PAREDE 2.....	16
3.2.3. PAREDE 3.....	19
3.2.4. PAREDE 4.....	20
4 Ensaio Experimental	21

4.1. INTRODUÇÃO	21
4.2. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL	21
4.2.1. SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	22
4.2.2. SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO E CORTE	27
4.2.3. ALTERAÇÃO DO SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO E CORTE	29
 5 Análise dos Ensaios Experimentais.....	31
5.1. INTRODUÇÃO	31
5.2. FASE 1 – COMPRESSÃO	31
5.2.1. PAREDE 1.....	31
5.2.2. PAREDE 2.....	37
5.2.3. PAREDE 3.....	41
5.2.4. PAREDE 4.....	46
5.2.5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS 4 PAREDES	49
5.3. FASE 2 – COMPRESSÃO E CORTE.....	51
5.3.1. PAREDE 1.....	52
5.3.2. PAREDE 2.....	55
5.3.3. PAREDE 3.....	58
5.3.4. PAREDE 4.....	61
5.3.5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS 4 PAREDES	63
5.4. FASE 3 – COMPRESSÃO E CORTE DA PAREDE 3 COM REFORÇO.....	64
5.4.1. COM REBOCO.....	65
5.4.2. SEM REBOCO	69
5.4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS ENSAIOS DA PAREDE 3.....	71
5.5. FASE 4 – COMPRESSÃO SIMPLES E CORTE COM CICLOS DE CARGA NOS DOIS SENTIDOS ..	72
5.5.1. PAREDE 3.....	72
5.5.1.1. Compressão	73
5.5.1.2. Corte com compressão constante	75
5.5.2. PAREDE 2.....	78
5.5.2.1. Com Revestimento.....	78
5.5.2.2. Sem Revestimento	81
5.5.2.3. Comparação do comportamento da Parede 2 com e sem revestimento	84
 6 Modelação Numérica	87

6.1. INTRODUÇÃO	87
6.2. CONCEÇÃO DO MODELO	87
6.2.1. MATERIAIS.....	87
6.2.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	88
6.2.2.1. Modelo de parede de tabique só com tábuas verticais (P1)	88
6.2.2.2. Modelo de parede de tabique com tábua diagonal (P2)	88
6.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	89
6.3.1. CARGA CRÍTICA TEÓRICA	89
6.3.1.1. Conceito de Carga Crítica	89
6.3.1.2. Carga Crítica Teórica da Parede 1	90
6.3.1.3. Carga Crítica Teórica Parede 2	90
6.3.2. CARGA CRÍTICA DO MODELO NUMÉRICO SEM REBOCO	91
6.3.2.1. Parede 1 (apenas tábuas verticais)	91
6.3.2.2. Parede 2 (com tábua diagonal)	92
6.3.3. COMPARAÇÃO DAS CARGAS CRÍTICAS	92
6.4. ANÁLISE NUMÉRICA À COMPRESSÃO.....	92
6.4.1. PAREDE 1	93
6.4.1.1. Carga crítica do modelo numérico com reboco numa das faces	93
6.4.1.2. Carga crítica do modelo numérico com reboco em ambas as faces	93
6.4.1.3. Variação do Módulo de Elasticidade do Reboco	94
6.4.1.4. Conclusões	94
6.4.2. PAREDE 2	95
6.4.2.1. Carga crítica do modelo numérico com reboco em uma das faces	95
6.4.2.2. Carga crítica do modelo numérico com reboco em ambas as faces	96
6.4.2.3. Evolução da carga crítica em função do módulo de elasticidade do reboco e do tipo de ligação	98
6.4.2.4. Conclusões	98
6.5. ANÁLISE NUMÉRICA AO CORTE	99
6.5.1. PAREDE 1	99
6.5.2. PAREDE 2	100
6.5.3. COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES	101
 7 Conclusão e Últimas Considerações	 103

Bibliografia.....	105
--------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Direções de crescimento da madeira [3]	5
Figura 2 - Igreja de Madeira de Borgund na Noruega, contruída no séc. XII	6
Figura 3 - Imperfeição dos nós na madeira [4]	6
Figura 4 - Fendas de secagem da Madeira [3]	6
Figura 5 - Efeito do fogo em viga de madeira [2]	7
Figura 6 - Ilustração resumo do ataque dos fungos na madeira [5]	8
Figura 7 – Ilustração resumo do ataque dos insetos na madeira [5]	9
Figura 8 - Exemplo de tratamento de gases venenosos	10
Figura 9 - Tratamento por impregnação em autoclave	11
Figura 10 - Paredes de tabique: a) Desenho ilustrativo [7] b) Parede de tabique em edifício no morro da Sé, Porto.....	11
Figura 11 - Pormenor de rede de galinheiro, muitas vezes encontrada, entre a argamassa e a parede de tabique [9, 10].....	12
Figura 12 - Pormenor ligação por pregos metálicos das tábuas verticais e frechais e ainda do enchimento com palha e terra [9].....	12
Figura 13 Parede interior de tabique, com algum revestimento, do edifício situado nas Travessa das Escadinhas, Viseu [9].....	12
Figura 14 - Parede de tabique em piso elevado[6]	13
Figura 15 - Exemplos de secções transversais das tábuas verticais [8]	13
Figura 16 - Exemplos de secções transversais dos fasquios (tábuas horizontais) [8]	14
Figura 17 - Esquema da Parede 1 (sem o fasquio horizontal) [10]	16
Figura 18 - Parede 1 (Face anterior e posterior).....	16
Figura 19 - Esquema da Parede 2 (sem o fasquio horizontal) [10]	17
Figura 20 - Parede 2 (Face anterior e posterior).....	18
Figura 21 - Pormenor da diferença de argamassas na Parede 2.....	18
Figura 22 – Esquema da Parede 3 (sem o fasquio horizontal) [10].....	19
Figura 23 - Parede 3 (face anterior e posterior).....	19
Figura 24 - Esquema da Parede 4 (sem o fasquio horizontal) [10]	20
Figura 25 – Parede 4 (face anterior e posterior)	20
Figura 26 - Dimensões da base de madeira	22
Figura 27 - Base de madeira com os perfis de fixação.....	23
Figura 28 - Perfis metálicos e esquema de distribuição de forças	23
Figura 29 - Esquema do setup do ensaio da fase 1 (compressão)	24
Figura 30 - Macaco com a célula de carga no piso inferior do LESE	25

Figura 31 - Varões de transmissão de carga	25
Figura 32 – Referencial utilizado na medição da rotação do frechal [12]	26
Figura 33 - Estrutura de referência para a medição dos deslocamentos para fora do plano.....	26
Figura 34 - Camarões onde ligam os LVDTs de fio	27
Figura 35 - Exemplo de LVDT de mola.....	27
Figura 36 - Esquema do setup na fase 2 (compressão e corte) [10].....	28
Figura 37 - Pórtico de reação da força horizontal de corte	28
Figura 38 - Macaco hidráulico que exerce a força horizontal de corte	28
Figura 39 - Esquema do novo sistema de fixação do frechal superior	29
Figura 40 - Estrutura de suporte do frechal na fase 4.....	30
Figura 41 - Pormenor da ligação dos LVDTs à argamassa e à madeira da Parede 1	32
Figura 42 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 1, Fase 1	32
Figura 43 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)	33
Figura 44 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)	33
Figura 45 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)	34
Figura 46 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 1	35
Figura 47 - Rotação do frechal superior da Parede 1	36
Figura 48 - Gráfico Força - Deslocamento médio para fora do plano da Parede 1	36
Figura 49 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 2, Fase 1	37
Figura 50 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 2	37
Figura 51 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 2	38
Figura 52 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 2.....	38
Figura 53 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 2.....	39
Figura 54 - Perfil transversal da parede 2.....	40
Figura 55 - Deformada da Parede 2.....	40
Figura 56 - Esquema disposição dos LVDTs da Parede 3, Fase 1	41
Figura 57 - LVDT Complementar	41
Figura 58 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 3	42
Figura 59 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 3	42
Figura 60 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 3.....	43
Figura 61 - Gráfico Força - Deslocamento da Ligação da tábua diagonal	44

Figura 62 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3	44
Figura 63 - Perfil transversal da parede 3	45
Figura 64 - Deformada da Parede 3	45
Figura 65 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 4, Fase 1	46
Figura 66 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida Parede 4	46
Figura 67 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada Parede 4	47
Figura 68 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 4	47
Figura 69 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 4	49
Figura 70 - Perfil transversal da parede 4	49
Figura 71 - Gráfico Força – Deslocamento, de todas as paredes	50
Figura 72 - Esquema disposição geral dos LVDTs da Fase 2	52
Figura 73 - Gráfico Força Horizontal - Deslocamento Médio da Parede 1	52
Figura 74 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 1	53
Figura 75 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 1	54
Figura 76 – Esquema de movimento de corpo rígido e de distorção por corte [12]	54
Figura 77 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 1 – Deslocamento Médio	55
Figura 78 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 2	55
Figura 79 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 2	56
Figura 80 - Exemplo do levantamento das tábuas verticais no frechal inferior	57
Figura 81 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 2	57
Figura 82 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 2 –Deslocamento Médio	58
Figura 83 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 3	58
Figura 84 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 3	59
Figura 85 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3	60
Figura 86 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 3 –Deslocamento Médio	60
Figura 87 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 4	61
Figura 88 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 4	62
Figura 89 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 4	62
Figura 90 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 4 –Deslocamento Médio	63
Figura 91 – Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, de todas as paredes	63
Figura 92 - Reforço na parte inferior da parede	64
Figura 93 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada	65
Figura 94 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 3 reforçada	66

Figura 95 – Pormenor da ligação dos medidores de deslocamento em diferentes tábuas.....	67
Figura 96 - Levantamento do frechal superior	68
Figura 97 - Gráfico Força Horizontal - Rotação do Frechal Superior da Parede 3 reforçada	68
Figura 98 – Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada	69
Figura 99 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento	69
Figura 100 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3 reforçada e s/ revestimento .	70
Figura 101 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento	71
Figura 102 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, de todos os ensaios da Parede 3	71
Figura 103 - Disposição de LVDTs da Parede 3, Fase 4 compressão	73
Figura 104 - Rotação excessiva do frechal em relação à parede 3 na fase 4.....	73
Figura 105 – Gráfico Força – Deslocamento Médio da Parede 3 na fase 4.....	74
Figura 106 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, da Parede 3 reforçada e s/ revestimento para os ciclos unidirecionais e bidirecionais	75
Figura 107 – Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da parede em ambas as extremidades	77
Figura 108 - Exemplo do levantamento do frechal superior na fase de ensaio 4.....	77
Figura 109 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento carregamento bidirecional	78
Figura 110 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 com revestimento	78
Figura 111 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional- Rotação do Frechal Superior da Parede 2 com revestimento	79
Figura 112 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 na parte Norte.....	80
Figura 113 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 na parte Sul	80
Figura 114 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 2 com revestimento, carregamento bidirecional	81
Figura 115 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 S/ Revestimento.....	81
Figura 116 – Gráfico Força Horizontal Bidirecional- Rotação do Frechal Superior da Parede 2 S/ Revestimento.....	82
Figura 117 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da parede 2 S/ Revestimento na parte Norte	83
Figura 118 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 S/ Revestimento na parte Sul	83

Figura 119 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 2 S/ Revestimento, carregamento bidirecional	84
Figura 120 - Gráfico Força Horizontal Unidirecional e Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 Com e Sem Revestimento	84
Figura 121 - Problema de Euler e formas de encurvadura [13].....	90
Figura 122 - Deformada da Parede 1, sem reboco, e respetivo fator de encurvadura	91
Figura 123 - Deformada da Parede 2, sem reboco, e respetivo fator de encurvadura	92
Figura 124 - Deformada da Parede 1, com reboco numa das faces	93
Figura 125 – Deformada da Parede 1, com reboco em ambas as faces	94
Figura 126 - Deformada da Parede 2, com reboco em uma das faces e ligação rígida	95
Figura 127 - Deformada da Parede 2, com reboco em uma das faces e ligação rotulada	96
Figura 128 - Deformada da Parede 2, com reboco em ambas as faces e ligação rígida.....	97
Figura 129 - Deformada da Parede 2, com reboco em ambas as faces e ligação rotulada.....	97
Figura 130 - Variação da carga critica em função do aumento do módulo de elasticidade para as várias disposições da parede 2.....	99
Figura 131 – Modelo da deformada da Parede 1 e respetivos deslocamentos para a força de corte	100
Figura 132 – Modelo da deformada da Parede 2 e respetivos deslocamentos para a força de corte	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade da Parede 1	35
Tabela 2 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da parede 2	39
Tabela 3 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da parede 3	43
Tabela 4 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da Parede 4	48
Tabela 5 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) de todas as paredes	51
Tabela 6 - Valores da rigidez ao corte da Parede 1	53
Tabela 7 - Valores da rigidez ao corte da Parede 2	56
Tabela 8 - Valores da rigidez ao corte da Parede 3	59
Tabela 9 - Valores da rigidez ao corte da Parede 4	61
Tabela 10 - Valores da rigidez horizontal de todas as paredes	64
Tabela 11 – Variação da rigidez da Parede 3 reforçada, para os vários ciclos de carga	65
Tabela 12 - Variação da rigidez da Parede 3 reforçada e s/ revestimento, para os vários ciclos de carga	70
Tabela 13 - Compilação das rigidezes da Parede 3, para os vários ensaios	72
Tabela 14 – Rigidez e módulo de elasticidade da Parede 3 com e sem revestimento	74
Tabela 15 - Valores de rigidez da Parede 3 para o último ciclo de cada carregamento	76
Tabela 16 - Valores da Rigidez da Parede 2 C/ Revestimento para ensaio bidirecional	79
Tabela 17 – Valores da Rigidez da Parede 2 S/ Revestimento para ensaio bidirecional	82
Tabela 18 – Valores da rigidez da Parede 2 para todas as fases de ensaio e para o último ciclo de deslocamento	85
Tabela 19 - Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional	87
Tabela 20 - Propriedades mecânicas dos pregos em aço	88
Tabela 21 – Elementos verticais da Parede 1	88
Tabela 22 – Ripas horizontais da Parede 1	88
Tabela 23 - Frechais	88
Tabela 24 - Elementos verticais da Parede 2	89
Tabela 25 - Elementos horizontais da Parede 2	89
Tabela 26 - Frechais	89
Tabela 27 - Carga Crítica Teórica da Parede 1	90
Tabela 28 - Carga Crítica Teórica da Parede 2	91
Tabela 29 - Comparação dos Valores de Carga Crítica	92
Tabela 30 – Resumo da variação da carga crítica da parede 1 com o módulo de elasticidade do reboco	94

Tabela 31 – Resumo da variação da carga crítica da parede 2 com o módulo de elasticidade	98
Tabela 32 – Comparação entre os valores de rigidez dos modelos numéricos com os valores experimentais	101

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A reabilitação do construído é um setor da construção que tem vindo a crescer e a desenvolver-se de forma acentuada. Resultado da crise financeira e imobiliária que se está a enfrentar, não tem havido grande investimento na construção de edifícios novos, nem a necessidade para tal, visto já existir um vasto património edificado. Como tal, as intervenções a ser feitas nos dias de hoje tendem cada vez mais para a manutenção e reabilitação dos edifícios existentes.

Grande parte dos edifícios alvo da reabilitação é anterior ao uso massivo do betão armado. Tratam-se, de construções onde os principais materiais empregues são a alvenaria e a madeira. Existe assim a necessidade de se conhecer melhor estes materiais, as suas características mecânicas e a compatibilidade entre eles de modo a tirar melhor partido dos mesmos.

Em particular, e no caso da madeira, as paredes de tabique são um elemento construtivo muito presente no edificado do nosso país, sendo necessário, como forma de valorizar este tipo de elemento estrutural, proceder-se ao seu estudo e perceber o seu comportamento e respetiva capacidade resistente.

No caso desta tese irá ser feita a análise experimental de 4 paredes de tabique retiradas de um edifício alvo de processo de reabilitação, situado em Viseu, onde funcionavam como paredes divisórias. Estas paredes foram sujeitas a ensaios de compressão e corte no plano, realizados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), de maneira a melhor compreender o seu comportamento mecânico. Um grande número destes ensaios foi realizado em data anterior a esta dissertação, pelo que, em relação a estes apenas foi feito o tratamento e análise dos resultados e retiradas as respetivas conclusões. Os ensaios realizados durante a elaboração deste trabalho são detalhados e os resultados são analisados em capítulo próprio.

O trabalho inclui ainda a elaboração e análise de modelos numéricos de duas destas paredes, cuja calibração e validação teve por base os ensaios efetuados.

1.2. METODOLOGIA

A metodologia para a realização desta dissertação teve as seguintes etapas:

- Estudo da bibliografia relacionada com o tema, nomeadamente relativa à reabilitação, estruturas em madeira e paredes de tabique;
- Avaliação experimental de paredes de tabique submetidas a força vertical variável crescente;
- Avaliação experimental de paredes de tabique submetidas a força vertical constante e força horizontal variável crescente;

- Avaliação experimental de paredes de tabique, com e sem reboco, reforçadas submetidas a força vertical constante e força horizontal variável crescente;
- Modelação e simulação numérica do comportamento estrutural de paredes de tabique;

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. No presente capítulo é feito o enquadramento do trabalho e um resumo dos ensaios realizados assim como da metodologia empregue nos mesmos.

No capítulo 2 é feito um enquadramento teórico às paredes de tabique. Para tal, é feita uma introdução à reabilitação explicando no que esta consiste e quais os seus princípios. É ainda feita uma descrição dos procedimentos que se devem adotar, sempre que possível, neste processo. É feita, também, uma exposição sobre a madeira como material estrutural, que agentes naturais interferem na alteração da sua capacidade resistente e como prevenir ou intervir aquando da presença dos mesmos. Por fim, é ainda explicado em que consiste a técnica construtiva do tabique, o seu enquadramento histórico e as dimensões geométricas mais comuns dos seus elementos.

O capítulo 3 serve para caraterizar as paredes em estudo, nomeadamente as suas dimensões geométricas, o seu estado de conservação e as suas particularidades (revestimento e presença de tábua diagonal).

No capítulo 4 são descritos e pormenorizados os setups de todas as fases desta campanha de ensaios experimentais.

No capítulo 5 são expostos todos os resultados recolhidos nos ensaios experimentais para cada fase. São comparados os comportamentos das paredes, à compressão e ao corte, quando estas são compostas apenas por tábuas verticais ou quando a parede tem na sua constituição uma tábua diagonal. É também estudado o contributo do reboco nesse mesmo comportamento das paredes. Numa das paredes foi ainda estudada a influência da fixação de uma cantoneira, na base da parede, para o seu comportamento.

No capítulo 6 é descrita a modelação numérica feita para duas paredes, parede 1 e parede 2, com o objetivo de se aferir a conformidade do valor numérico com o valor teórico. De seguida, foram comparados os valores numéricos com os experimentais com o objetivo de se perceber a viabilidade da simulação numérica para estimar o comportamento das paredes na realidade, tanto sob forças de compressão como de corte no plano.

Para finalizar, no capítulo 7, são expostas as conclusões retiradas desta campanha experimental e são sugeridos futuros trabalhos neste âmbito, de maneira a complementar este estudo.

2

ENQUADRAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE

2.1. INTRODUÇÃO

Portugal, assim como vários países europeus, sofreu uma grande evolução ao nível do ambiente urbano e dos transportes. Esta evolução na rede de transportes provocou o êxodo da população dos centros das cidades para as periferias, em busca de melhores condições de habitação e de vida. O resultado deste movimento migratório foi uma redução significativa da densidade populacional nos centros das cidades, tornando-se cada vez mais locais meramente turísticos, laborais e de lazer, deixando assim muitos edifícios habitacionais abandonados.

Com a estagnação do setor da construção a nível nacional e com a degradação e desuso do património antigo edificado, em particular nos centros históricos, os municípios têm vindo a tentar, através de várias iniciativas e incentivos, a repovoação e dinamização destes centros. Como tal, foi crescendo a necessidade de se intervir no edificado, dado o precário estado de conservação de muitos dos edifícios, de modo a provê-los das condições, tanto de segurança estrutural, como de conforto ao uso de maneira a cativar a reocupação dos mesmos.

O interesse pelas paredes de tabique aparece no âmbito destes processos de reabilitação, visto tratar-se de um elemento particularmente presente em edificado antigo. Existe a necessidade de perceber melhor o seu comportamento estrutural, de forma a poder ser feita uma intervenção sustentada nas reais necessidades de cada edifício.

2.2. REABILITAÇÃO

Nos dias que correm no sector da construção a palavra reabilitação tem vindo a ganhar um grande relevo, porém frequentemente essa palavra é utilizada de forma incorreta.

A reabilitação deve corresponder ao processo de recuperação da função de algo obsoleto, habilitando-o para novas funções, ou desempenhos de acordo com as novas exigências da vida atual. Esta recuperação deve procurar aproveitar ao máximo os materiais e técnicas construtivas já presentes no edifício e apenas reforçar e reabilitar o necessário, mantendo assim a identidade do edifício. Este esforço pela preservação da identidade dos edifícios é de grande importância para o desenvolvimento sustentável, para a conservação do património edificado e acima de tudo para a manutenção da cultura e identidade de uma população[1].

Porém, como referido, o que se vende como reabilitação corresponde frequentemente à construção de um edifício novo, mantendo apenas as fachadas, dando assim uma ideia ilusória de que se reabilitou. A isto não se deve chamar reabilitação, mas reconstrução, ou mesmo construção nova.

2.2.1. PRINCÍPIOS DA REABILITAÇÃO

Posto isto, a reabilitação rege-se por uma série de princípios que devem ser tendencialmente, e sempre que possível, respeitados [1]:

- Todas as ações de intervenção devem ser indispensáveis;
- A intervenção deve ter em conta a segurança e a importância cultural e histórica do edifício, ou seja ser o menos intrusiva/ invasiva possível, mas garantindo a segurança e durabilidade;
- As soluções devem ter em conta as ações que causaram os danos e deformações e ainda as ações que vão atuar no futuro;
- As soluções adotadas devem ser tendencialmente “reversíveis”, de maneira a poderem ser substituídas por outras soluções que no futuro se descubram ser mais apropriadas;
- A escolha das soluções deve ter em consideração a compatibilidade dos materiais utilizados, tentando evitar danos a longo prazo resultantes de incompatibilidades;
- A intervenção deve respeitar ao máximo os materiais e as técnicas de construção originais, dando sempre prioridade à reparação em detrimento da substituição;
- As soluções de intervenção devem ser “repetíveis” de modo a poderem ser repetidas caso cheguem ao término da sua vida;
- Todo o processo de execução deve ser monitorizado e documentado, ficando este como parte da história do edifício;

Em particular, uma manutenção adequada evita de modo significativo uma posterior intervenção.

2.2.2. PROCESSO DA REABILITAÇÃO

O processo da reabilitação consiste em várias etapas, tendo em conta todos os princípios enumerados anteriormente, que devem ser seguidos para que a reabilitação seja feita da melhor maneira, com o maior aproveitamento dos materiais possível e com toda a informação necessária para a melhor escolha de soluções e medidas [1].

Primeiramente, deve recolher-se, nas câmaras municipais, ou junto dos proprietários, todos os dados históricos da construção em análise, nomeadamente intervenções anteriores, processo construtivo, plantas estruturais e tipos de material [1].

O passo seguinte é a visita ao local para fazer uma inspeção visual da construção. Esta visita deve ser feita por uma equipa de dois ou mais elementos, tendo pelo menos um deles experiência e conhecimento sobre os materiais e elementos estruturais alvo da inspeção. Esta inspeção tem como objetivo identificar danos e o estado de degradação das estruturas, efetuar um levantamento fotográfico do edifício, avaliar o estado de estabilidade e segurança e realizar ensaios *in situ*, tendencialmente não destrutivos, para aferir a real condição estrutural do edifício. Este passo é de grande importância porque é aqui que se vão retirar informações fulcrais na determinação do estado de conservação do edifício e que sustentam a estratégia de intervenção. Esta informação integra o relatório de inspeção e diagnóstico. Este relatório é construído de forma a caracterizar a construção e o seu estado de conservação e justificar a intervenção. Contudo, a realização deste relatório apenas é necessária quando se intervém em edifícios classificados [1].

Após a elaboração do relatório de inspeção e diagnóstico, segue-se a fase de intervenção com o projeto de execução.

Por último, e após a intervenção, pode ainda ser precisa uma fase de monitorização para verificação do correto funcionamento da solução implementada. A recolha de informação deve ser feita durante um ano de maneira a contemplar todas as estações do ano e, com isto, integrar os movimentos/ esforços resultantes das variações de temperatura e humidade a que a estrutura irá ser sujeita durante o seu funcionamento normal [1].

2.3. ESTRUTURAS EM MADEIRA

A madeira é um material natural, utilizado na construção desde os primórdios da humanidade. Esta utilização deve-se ao facto de ser um recurso natural, sustentável, resistente e à sua relativa leveza e impermeabilidade [2].

Contudo, para a sua correta utilização, são necessários conhecimentos técnicos particulares, nomeadamente sobre as propriedades físicas e de resistência características de cada espécie e ainda ter em conta a sua inflamabilidade e a grande suscetibilidade a ataques fúngicos e/ou de insetos, assim como a variabilidade que estas características podem assumir dentro da mesma espécie [2].

2.3.1. MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

A madeira como material estrutural tem a particularidade de apresentar propriedades mecânicas distintas nas diferentes direções de crescimento, sendo elas a tangencial, axial e radial (Figura 1). A madeira apresenta um bom comportamento à compressão e à flexão composta e desviada, cargas às quais está sujeita na natureza.

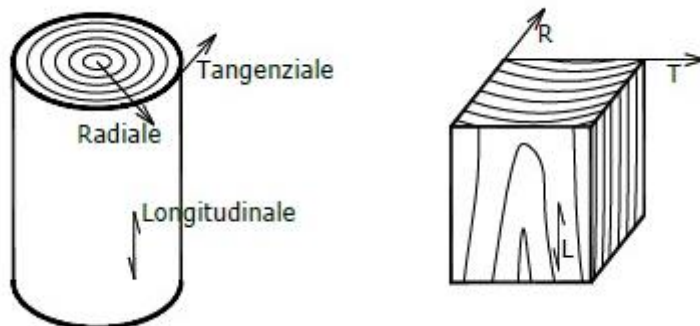


Figura 1 - Direções de crescimento da madeira [3]

Apesar de se pensar que tem uma durabilidade muito inferior aos materiais que se utilizam hoje em dia, aço e betão armado, esse pressuposto está errado, pois com a devida manutenção e tratamento as estruturas de madeira podem ter centenas de anos de existência [2, 3]. Exemplo disso mesmo é o edifício ilustrado na Figura 2.



Figura 2 - Igreja de Madeira de Borgund na Noruega, construída no séc. XII

Porém, sendo a madeira um material natural, as suas características de resistência e de durabilidade estão diretamente ligadas às várias espécies arbóreas existentes [3]. Dentro da mesma espécie, existem várias classes, ou são atribuídos diferentes valores de resistência em função de fatores como [2, 3]:

- A presença de defeitos e imperfeições, o número de nós, de onde derivam os ramos – ver Figura 3;

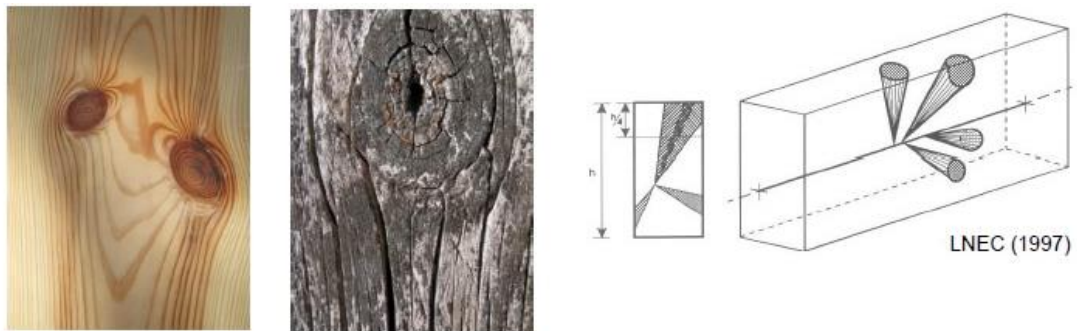


Figura 3 - Imperfeição dos nós na madeira [4]

- A humidade a que a peça está exposta. Esta humidade, quando em excesso, provoca redução da capacidade resistente e, após secagem, fendas na seção transversal, fendas estas que não são iguais devido ao comportamento anisotrópico da madeira. Estas fendas afetam a resistência mecânica e potenciam as ações dos agentes bióticos - Figura 4;

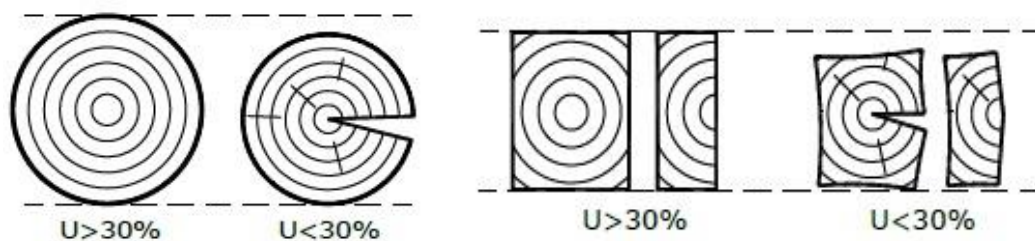


Figura 4 - Fendas de secagem da Madeira [3]

- Da região do tronco de onde é retirada a madeira, se do durame, parte central, ou do alburno, parte exterior do tronco.

É necessário ainda considerar a resistência da madeira em relação ao fogo, pois é comum pensar-se que esta não tem resistência a esta ação por ser vista como combustível. Porém, a madeira apresenta um comportamento melhor que as estruturas metálicas em relação a este tipo de ação devido ao seu processo de combustão. O fogo começa por queimar a zona exterior da madeira, que forma uma camada carbonizada que ao estar em redor do resto da peça isola-a termicamente e ajuda na contenção da propagação do incendio. Sendo assim, o dimensionamento para este tipo de ação, é feito em função do tempo de exposição e para uma secção efetiva (secção resistente no interior, não afetada pelo fogo - Figura 5) menor do que a secção real [2, 3].



Figura 5 - Efeito do fogo em viga de madeira [2]

2.3.2. CONSERVAÇÃO DA MADEIRA

Para além da resistência em função da espécie, temos também outra preocupação com as estruturas de madeira que são o tipo de exposição e os ataques dos fungos e dos insetos que, afetam a capacidade resistente e podem destruir por completo a madeira [3].

2.3.2.1. Classe de Exposição

Como referido, cada espécie tem uma resistência própria, assim como cada espécie apresenta melhor ou pior comportamento em função da sua classe de exposição, ou de serviço. Logo, o projetista, deve ter isso em conta no que toca à definição das propriedades mecânicas do material, adequando assim a espécie à classe de exposição a que vai ser sujeito em serviço, nomeadamente:

- Classe de serviço 1 – ambiente interior protegido, com uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar acima dos 65% apenas durante algumas semanas por ano (locais cobertos e fechados);
- Classe de serviço 2 – ambiente interior não protegido ou exterior não sujeito a contacto direto com a água das chuvas e com contacto pontual com água líquida, com uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar acima dos 85% apenas durante algumas semanas por ano (locais cobertos e piscinas);

- Classe de serviço 3 – ambiente exterior com contacto frequentes de águas das chuvas, muitas vezes durante longos períodos de tempo, com valores do teor de água superiores aos presentes na classe de serviço 2 (locais ao ar livre).

2.3.2.2. Ataque Fúngico

O ataque dos fungos propaga-se por via aérea através de esporos que se depositam na madeira. Porém, estes só germinam e dão início ao ataque se a humidade da madeira ultrapassar os 20%. Este ataque pode não ser visível a olho nu. Os fungos atacam quimicamente a madeira, o que provoca uma grande diminuição de resistência numa primeira fase do ataque, só depois se tornando visível a olho nu. Quando a humidade baixa os 20%, o ataque cessa; porém, este continua quando a humidade volta a subir acima dos 20% [3]. A Figura 6 ilustra e resume este tipo de ataque na madeira.

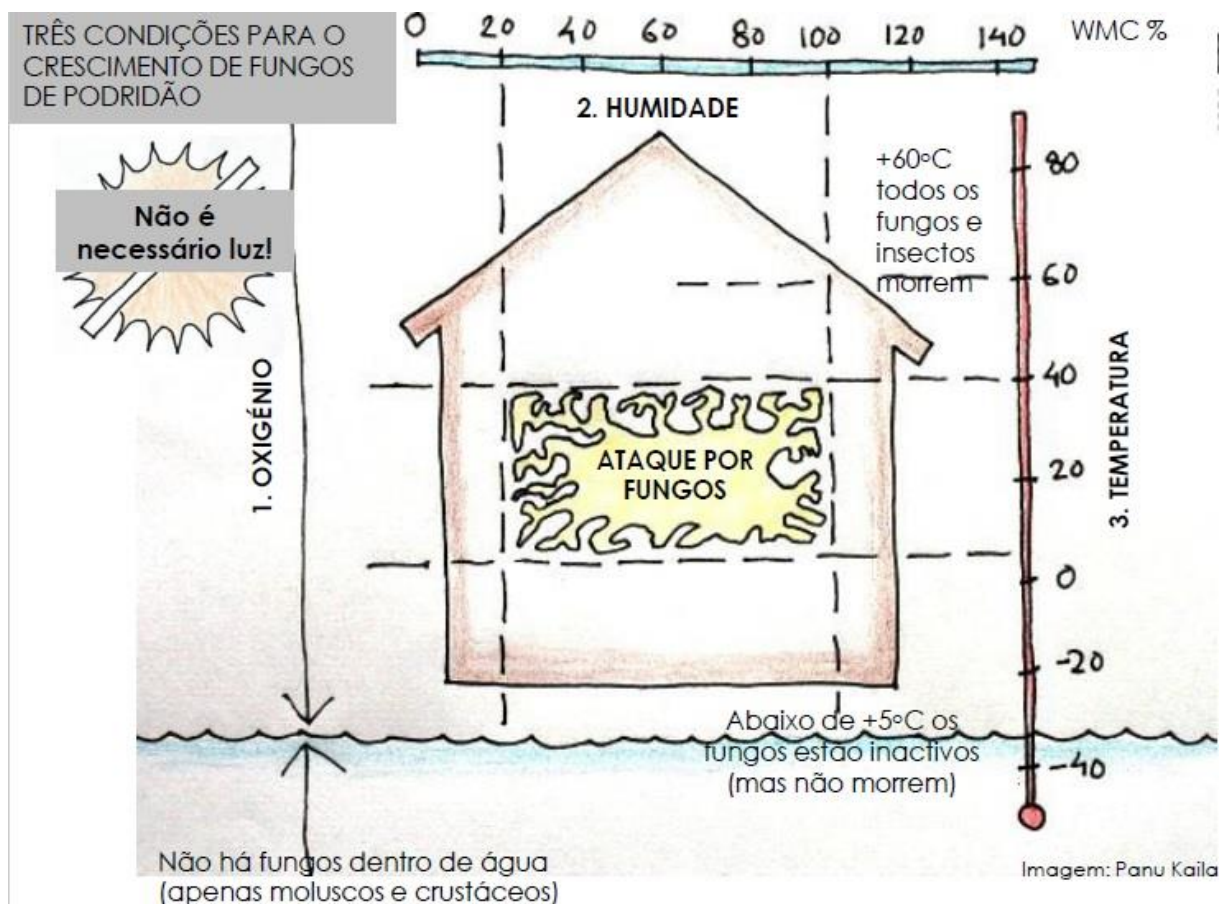


Figura 6 - Ilustração resumo do ataque dos fungos na madeira [5]

O alburno e o durame são igualmente atacados pelos fungos, mas posta a grande variedade de espécies, existem algumas em que o durame é mais resistente do que noutras espécies. São exemplo disto o carvalho e castanheiro [3].

2.3.2.3. Ataque de Insetos

Este tipo de ataque ocorre com a deposição de ovos nas pequenas cavidades ou fissuras da madeira. Quando o ovo eclode a larva começa a comer e a escavar a peça, passa a sua vida dentro dela e quando ocorre a metamorfose este sai da mesma já em forma de inseto, reproduz-se e volta a depositar os seus

ovos na madeira, dando novamente início ao ciclo destrutivo, que é o seu ciclo de vida - Figura 7. Este tipo de ataque é mais nocivo em estruturas de madeira maciça, pois na madeira lamelar colada o inseto apenas come a madeira da camada onde os ovos forem depositados, sendo impossível ultrapassar a cola [3].

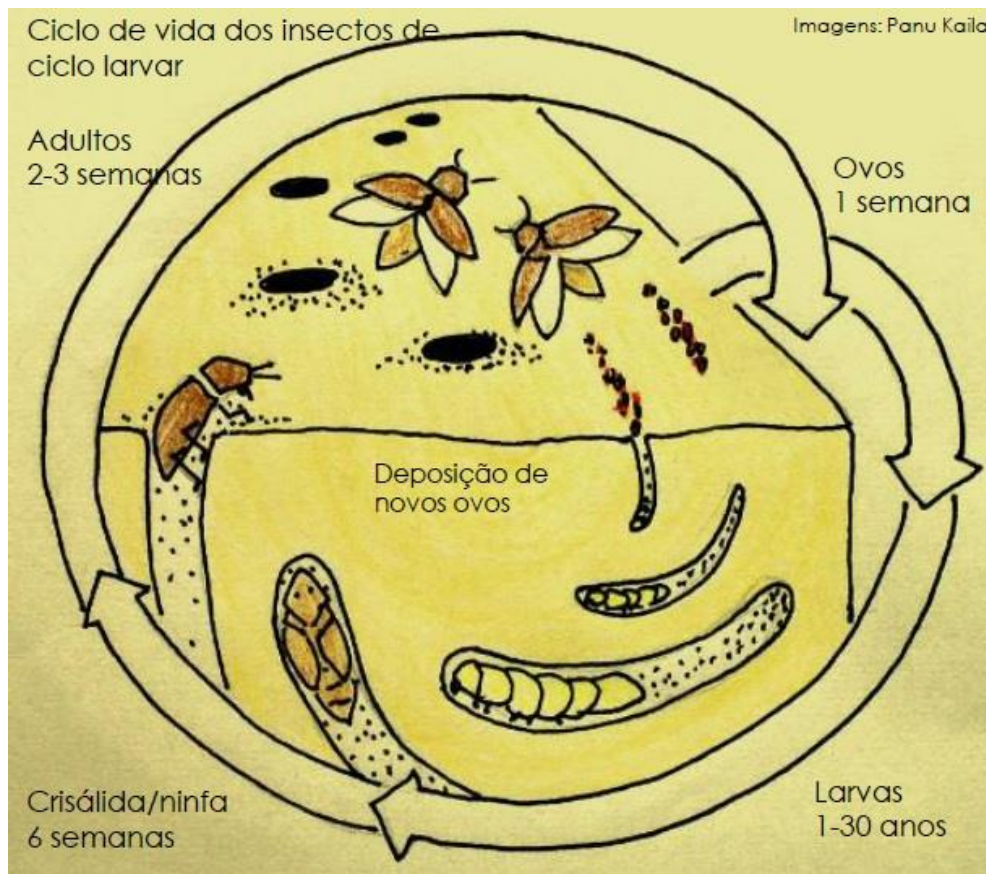


Figura 7 – Ilustração resumo do ataque dos insetos na madeira [5]

O motivo deste ataque é o amido ainda presente na madeira, porém com o passar do tempo este transforma-se numa substância que não agrada aos insetos e assim ao fim de entre 80 a 100 anos podemos considerar que a madeira é quase imune ao ataque dos insetos [3].

2.3.3. INTERVENÇÃO DE CONSERVAÇÃO

Antes de qualquer tipo de intervenção, ou tratamento devemos averiguar que tipo de ataque está a afetar a estrutura e perceber a sua causa, intervindo assim na fonte do mesmo e só depois atuando na estrutura em si, visto que se não se eliminar o mal na origem a intervenção vai ser infrutífera [2].

Assim sendo, depois de eliminado o mal na origem, e estando já o ataque em curso, este procedimento em relação ao ataque fúngico é suficiente, salvo raras exceções, visto ser influenciado pela humidade [3].

No que toca ao ataque dos insetos, temos dois tipos de tratamento. Existe um tratamento mais barato e não invasivo, através da aplicação exterior de vernizes, gel ou outras soluções que impeçam o futuro depósito de mais ovos, visto não ser possível atuar nas larvas existentes dentro da estrutura. O segundo método é um tratamento mais invasivo, dispendioso e de difícil execução; consiste no uso de gases

venenosos que erradicam os agentes já presentes na madeira [3]. A Figura 8 ilustra a aplicação deste mesmo método.



Figura 8 - Exemplo de tratamento de gases venenosos

2.3.3.1. Prevenção

Temos ainda outra estratégia no que toca à proteção da madeira, que passa pelo tratamento preventivo desta, antes de ser posta em serviço [3]. Existem dois tipos de tratamento no que toca a este tipo de intervenção [3]:

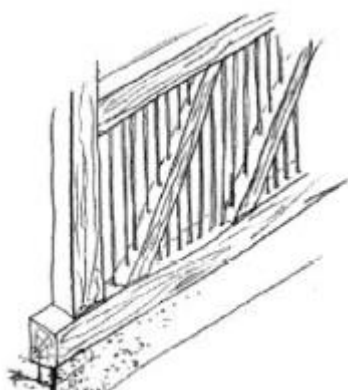
- Um tratamento superficial através de permetrina ou sais de boro que evitam a deposição dos ovos dos insetos impedindo assim o ataque. O tratamento, porém, tem de ser repetido sempre que ocorram fendas na madeira, pois surgem novas superfícies não revestidas de tratamento. Quanto ao ataque fúngico, este tratamento apenas tem o efeito de o retardar.
- Nas espécies permeáveis podemos então fazer um tratamento mais profundo por impregnação em autoclave, como demonstra a Figura 9, que garante uma grande eficácia contra fungos e insetos a estruturas expostas a classes de exposição muito elevadas, visto o tratamento ser superficial e em profundidade.



Figura 9 - Tratamento por impregnação em autoclave

2.4. TABIQUE

O tabique é uma técnica construtiva económica e sustentável, que se pode simplificarmente descrever como uma estrutura de madeira revestida em ambas as faces por uma argamassa pobre ou mesmo terra, como ilustram a Figura 10 e a Figura 13 [6].



a)



b)

Figura 10 - Paredes de tabique: a) Desenho ilustrativo [7] b) Parede de tabique em edifício no morro da Sé, Porto

Esta é uma técnica construtiva cuja origem, em Portugal, remonta ao século XVII e finda no princípio do século XX com o aparecimento da alvenaria de tijolo e do betão. Apesar de estar presente em todo o país, é no nordeste de Portugal onde apresenta mais relevância e quantidade de construções, nomeadamente em Trás-os-Montes e Alto Douro [8].

Esta técnica construtiva consiste numa estrutura resistente em madeira, um enchimento e revestimento constituído por um compósito de argila, cal, terra e até fibras vegetais e pregos metálicos - Figura 12

[8]. Por vezes, são ainda encontradas paredes com uma rede de galinheiro localizada entre a madeira e uma argamassa cimentícia, mas que deverá corresponder a intervenções de reabilitação mais recentes, Figura 11 . Este tipo de intervenção, bastante intrusiva pretende conferir uma maior resistência à parede.

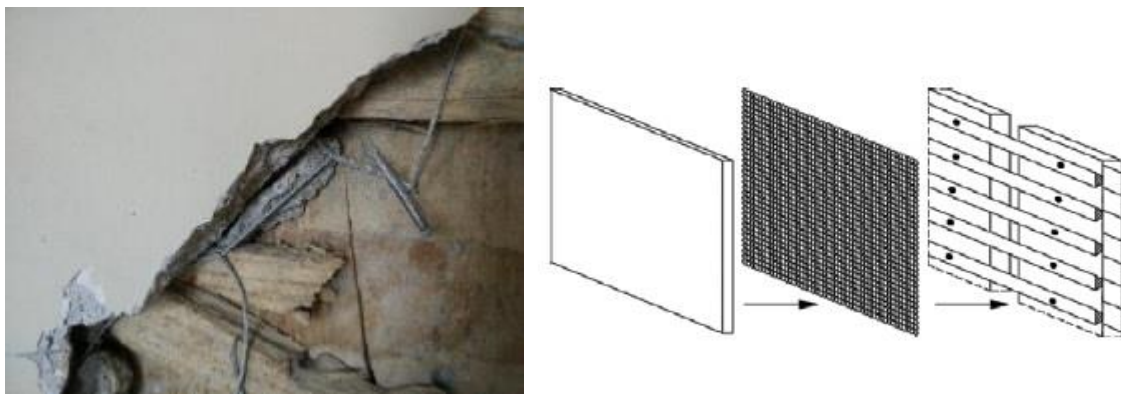


Figura 11 - Pormenor de rede de galinheiro, muitas vezes encontrada, entre a argamassa e a parede de tabique [9, 10]



Figura 12 - Pormenor ligação por pregos metálicos das tábuas verticais e frechais e ainda do enchimento com palha e terra [9]



Figura 13 Parede interior de tabique, com algum revestimento, do edifício situado nas Travessa das Escadinhas, Viseu [9]

Assim sendo, temos várias formas de construção de estruturas em tabique. Estas construções normalmente constituem elementos verticais, paredes interiores ou exteriores, que podem apresentar várias disposições construtivas [8].

Após vários estudos, conclui-se que a disposição mais corrente na região de Trás-os-Montes e Alto Douro é constituída por tábuas verticais ligadas entre si por ripas horizontais, fasquio, em ambas as faces. São encontradas ainda outras soluções, nomeadamente com duas camadas de tábuas, a primeira disposta na vertical e a segunda na diagonal, ligadas entre si por pregos e pelo fasquio [6].

Todas estas paredes são então revestidas com uma argamassa pobre de saibro e cal, sem grande rigidez, que confere à estrutura boas qualidades térmicas e acústicas, tendo ainda a capacidade de proteger a madeira contra ataques dos insetos, fúngicos e em relação ao fogo [8]. Verifica-se que estas estruturas são maioritariamente utilizadas como paredes interiores, divisórias, ou como paredes exteriores de pisos elevados, em particular em pisos recuados dada a boa relação entre resistência e peso do material; em contrapartida, as paredes do rés-do-chão são vulgarmente em alvenaria de pedra, como se observa na Figura 14 [8]. Inspeções a edifícios antigos mostram que as paredes divisórias situadas sobre pisos térreos são frequentemente vítimas de ataques dos agentes biológicos. Estas patologias são o resultado do maior teor de humidade dessas zonas, por vezes mal ventiladas, que geram o ambiente ideal para estes tipos de ataques [6].



Figura 14 - Parede de tabique em piso elevado[6]

Sendo o tabique uma técnica tradicional que faz uso de materiais naturais, ou seja não processados nem fabricados industrialmente de forma *standard*, as dimensões dos elementos destas paredes são assim bastante diversas, como se observa na Figura 15. Assim, o levantamento destas paredes em vários edifícios localizados na cidade do Porto mostra que as tábuas verticais apresentam larguras médias entre 15 e 20cm, uma espessura que varia entre os 2,5 e os 5 cm e apresentam um espaçamento médio entre tábuas de 2cm. Quando dispõem de uma tábua diagonal, esta apresenta uma espessura média entre 15 a 20 cm. As ripas horizontais ou fasquios, apresentam normalmente, secção transversal quadrangular, ou trapezoidal - Figura 16, tendo dimensões médias de 2,5 cm na face maior, 2 cm na face menor e uma espessura de 1,5cm. Os fasquios apresentam ainda um espaçamento médio de 3 a 4 cm.[11]

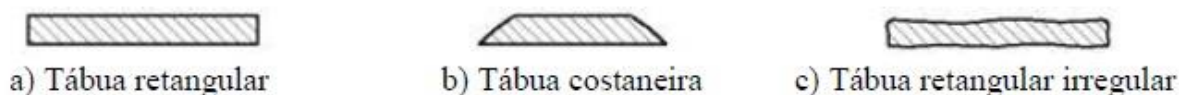


Figura 15 - Exemplos de secções transversais das tábuas verticais [8]

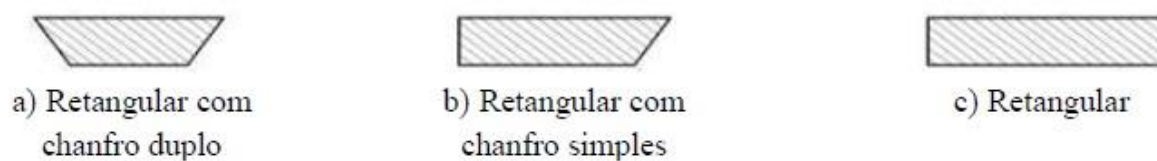


Figura 16 - Exemplos de secções transversais dos fasquios (tábuas horizontais) [8]

Estas paredes são constituídas por tábuas inteiriças (no caso da existência de tábuas diagonais isoladas, as tábuas verticais podem ser interrompidas no contato com as tábuas diagonais), de espessura aproximadamente constante mas largura variável; aspeto tosco sem acabamento cuidado e superfície rugosa [6].

3

PAREDES EM ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

As paredes que foram objeto de estudo nesta dissertação, foram paredes interiores retiradas de um edifício alvo de reabilitação localizado na Travessa das Escadinhas da Sé, em Viseu, edifício referido como “1” e descrito e analisado na tese de mestrado de Carlos Fernandes [9]. Foi permitido o estudo destas paredes, dada a necessidade de demolição, ou desmonte implicadas no processo de reabilitação deste edifício. Estas foram então transportadas de Viseu para o LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural), onde se realizou o estudo do seu comportamento através de ensaios de carga de maneira a percebermos melhor o funcionamento e a capacidade resistente deste tipo de elementos estruturais.

3.2. CARATERIZAÇÃO DAS PAREDES

3.2.1. PAREDE 1

A parede 1 é uma parede composta apenas por tábuas verticais e revestida em ambas as faces por uma argamassa à base de cimento - Figura 18. Esta parede tem uma altura de 2,43m e uma largura de 1,12m. Na sua extremidade inferior, todas as tábuas apresentam ataque de insetos coleópteros (caruncho), enquanto na extremidade superior apenas uma tábua apresenta este tipo de ataque.

Esta parede é constituída por 5 tábuas verticais, Figura 17, com uma largura média de 16,65cm, uma espessura média de 4,19cm e um espaçamento médio entre tábuas verticais de 4,15cm.

Na direção horizontal, é constituída por 32 ripas horizontais (fasquios) com uma largura média de 3,42cm e uma espessura média de 1,16cm.

Verificou-se ainda a presença de uma malha metálica, do tipo “rede de galinheiro”, integrada no reboco, dotando esta camada de uma maior capacidade resistente, nomeadamente à tração, promovendo, aparentemente, um melhor comportamento da parede.

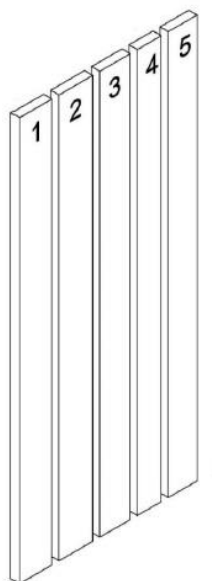


Figura 17 - Esquema da Parede 1 (sem o fasquio horizontal) [10]



Figura 18 - Parede 1 (Face anterior e posterior)

3.2.2. PAREDE 2

A parede 2 é uma parede composta por uma tábua diagonal e tábuas verticais que partem, ou terminam na tábua diagonal, Figura 19. Apresenta uma face totalmente revestida por argamassa e a outra revestida quase na sua totalidade, - Figura 20. Esta parede tem uma altura de 2,43m e uma largura de 1,15m. Tal

como na parede 1, toda a extremidade inferior da parede apresenta ataque por parte de insetos coleópteros (caruncho), enquanto na extremidade superior apenas uma tábua apresenta este tipo de ataque.

As tábuas verticais apresentam larguras distintas nos troços para cima e para baixo da tábua diagonal. Porém, podemos assumir que apresentam uma largura média de 16cm e uma espessura média de 4,68cm.

Na direção horizontal, é constituída por 29 ripas horizontais (fasquios) com uma largura média de 3,75cm e espessura média de 0,61cm.

Verifica-se a presença da malha metálica na face que está revestida na sua totalidade, associada a uma argamassa de cimento. A face posterior apresenta uma argamassa de cal de acabamento sobre uma camada inferior de aspeto terroso com palha, Figura 21.

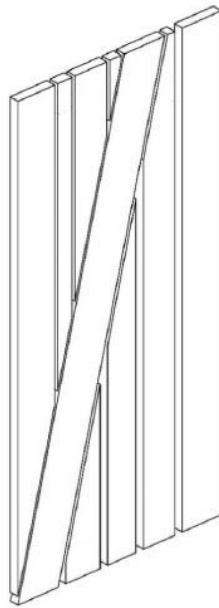


Figura 19 - Esquema da Parede 2 (sem o fasquio horizontal) [10]



Figura 20 - Parede 2 (Face anterior e posterior)

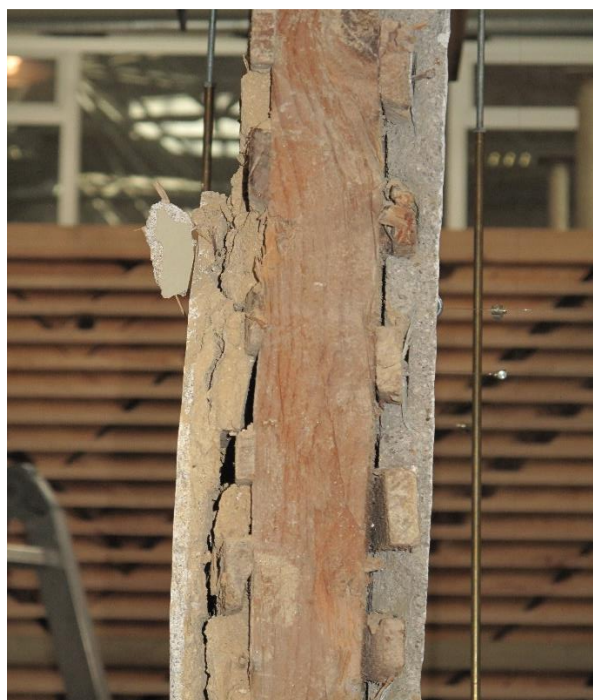


Figura 21 - Pormenor da diferença de argamassas na Parede 2

3.2.3. PAREDE 3

A parede 3, tal como a parede 2, é composta por uma tábua diagonal e tábuas verticais, Figura 22. Porém, apresenta revestimento apenas numa face, Figura 23. A parede tem uma altura de 2,38m e uma largura de 1,05m e não apresenta indícios de ataque biótico.

As suas tábuas verticais apresentam uma largura média de 16,85cm e uma espessura média de 4,65cm.

Na direção horizontal, é constituída por 32 ripas horizontais (fasquios) com uma largura média de 3,12cm e uma espessura média de 0,69cm.

A face revestida apresenta um reboco de cal sem a presença de rede metálica.

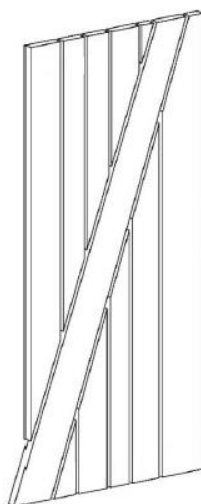


Figura 22 – Esquema da Parede 3 (sem o fasquio horizontal) [10]



Figura 23 - Parede 3 (face anterior e posterior)

3.2.4. PAREDE 4

A parede 4 é uma parede composta apenas por tábuas verticais e apresenta revestimento em apenas uma das suas faces e de forma integral, Figura 25. Tem uma altura de 2,385m e uma largura de 0,97m.

A parede é constituída por 5 tábuas verticais, Figura 24, com uma largura média de 18,43cm, uma espessura média de 5cm e um espaçamento médio entre tábuas verticais de 3,16cm.

Na direção horizontal, é constituída por 32 ripas horizontais (fasquios) com uma largura média de 2,96cm e uma espessura média de 0,71cm.

Observa-se a presença de uma rede metálica na face revestida, integrada numa argamassa cimentícia.

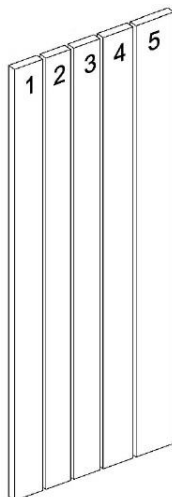


Figura 24 - Esquema da Parede 4 (sem o fasquio horizontal) [10]



Figura 25 – Parede 4 (face anterior e posterior)

4

ENSAIO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido, o âmbito desta tese de dissertação foi o ensaio e estudo de quatro paredes de tabique retiradas de um edifício existente. Este estudo foi dividido em 4 fases de ensaios experimentais.

A primeira fase de ensaio consiste no ensaio das paredes sob força de compressão variável crescente, fazendo-as instabilizar até à sua capacidade limite de força resistente. Esta fase de ensaio já tinha sido realizada pelo que só se fez o tratamento de dados e a respetiva análise.

A segunda fase consiste no ensaio das mesmas paredes sob força de compressão constante de 10KN/m e força horizontal de corte crescente até atingirem a capacidade resistente, ou valores próximos do limite de rotura das paredes (ensaio já alvo de uma tese de mestrado por parte do Nuno Miguel de Almeida Ferreira; porém foi feita uma nova análise aos dados de ensaio).

Após a realização das duas primeiras fases e com a análise do comportamento das paredes e dos resultados dos ensaios, realizou-se a terceira fase de ensaio que foi dividida em duas partes sucessivas. A primeira parte da terceira fase consistiu em ensaiar a parede 3 (parede de tabique com tábua diagonal) com força de compressão constante e força horizontal de corte crescente, e com o frechal inferior fixo à base por meio de uma cantoneira metálica, de modo a impedir o seu levantamento durante os ensaios. A segunda parte da terceira fase difere da primeira parte apenas na remoção do reboco da parede, de forma a aferir o seu contributo no comportamento da mesma. Esta fase de ensaios também já tinha sido realizada, pelo que também apenas foi feito o seu tratamento de dados e análise de resultados.

Após o tratamento e estudo dos resultados obtidos nas três primeiras fases de ensaio, decidiu-se realizar a quarta e última fase de ensaios, que consistiu em testar as paredes sujeitas a uma força horizontal de corte com ciclos de carga nos dois sentidos de forma a avaliar o efeito da tábua diagonal na parede quando esta é comprimida ou tracionada. Esta fase contou ainda com uma análise à compressão das paredes, agora sem o reboco, com o objetivo de verificar, por comparação com os ensaios das outras fases, o efeito do reboco na rigidez das paredes. Nesta fase já foi feito todo o acompanhamento na montagem do ensaio e na análise e tratamento dos dados.

É de referir ainda que os ensaios não levaram as paredes à rotura, dada a necessidade de serem utilizadas posteriormente para outros ensaios complementares.

4.2. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL

As paredes foram ensaiadas à compressão simples e ao corte no plano da estrutura com força de compressão constante. Como tal, o seu *setup* foi sofrendo algumas modificações de modo a adequar-se ao tipo de ensaio realizado.

Para a obtenção dos dados destes ensaios, foi utilizado o programa PECA, desenvolvido pelo LESE, que exporta para o Excel os dados recolhidos pelos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) e pelas células de carga.

4.2.1. SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão simples consistem nas paredes serem ensaiadas para uma força vertical variável crescente, com o *setup* a ser montado de maneira a simular o melhor possível as condições em que as paredes se encontram no edifício. Como tal, para a base foi elaborada uma viga com 2,5m de comprimento e secção quadrangular de 8x8cm² onde foi disposta uma abertura longitudinal para se poder fazer o encaixe do frechal das paredes na base - Figura 26. A base foi fixa ao pavimento do laboratório por via de quatro perfis metálicos que impediam o seu deslocamento, como apresentado na Figura 27.

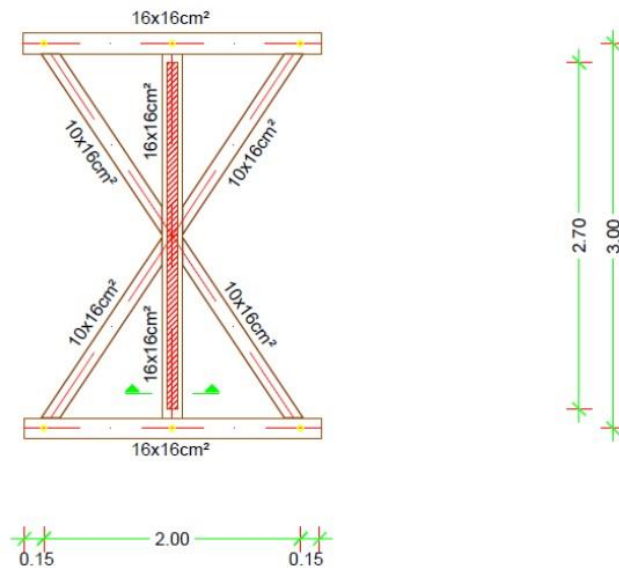


Figura 26 - Dimensões da base de madeira



Figura 27 - Base de madeira com os perfis de fixação

Para a parte superior da parede, foi também elaborada uma viga igual á disposta na base de modo a se encaixar o frechal superior da parede, onde vai ser aplicada a carga vertical de compressão. Pretendeu-se simular a aplicação de uma carga vertical distribuída. De maneira a consegui-lo, foram utilizados 3 perfis metálicos, dois de 1 metro e um de 2m - Figura 28. A força é aplicada através de um macaco, posicionado no piso inferior do LESE, que, estando ligado a dois varões e fazendo uso da laje de piso como reação, transmite a força ao cabeço situado no perfil metálico de 2m que, por sua vez, distribui a carga pelos dois perfis de 1m que impõem a força no topo da parede em 4 pontos equidistantes.



Figura 28 - Perfis metálicos e esquema de distribuição de forças

Com a análise do comportamento da parede, previu-se que o topo da parede, estando livre, iria tender a deslocar-se para fora do plano, o que não corresponderia à situação real da parede no edifício. Para resolver este problema, foi então construído um pórtico, com três braços, que impediu o deslocamento do topo da parede para fora do plano, a Figura 29 resume e esquematiza o *setup* utilizado neste ensaio.

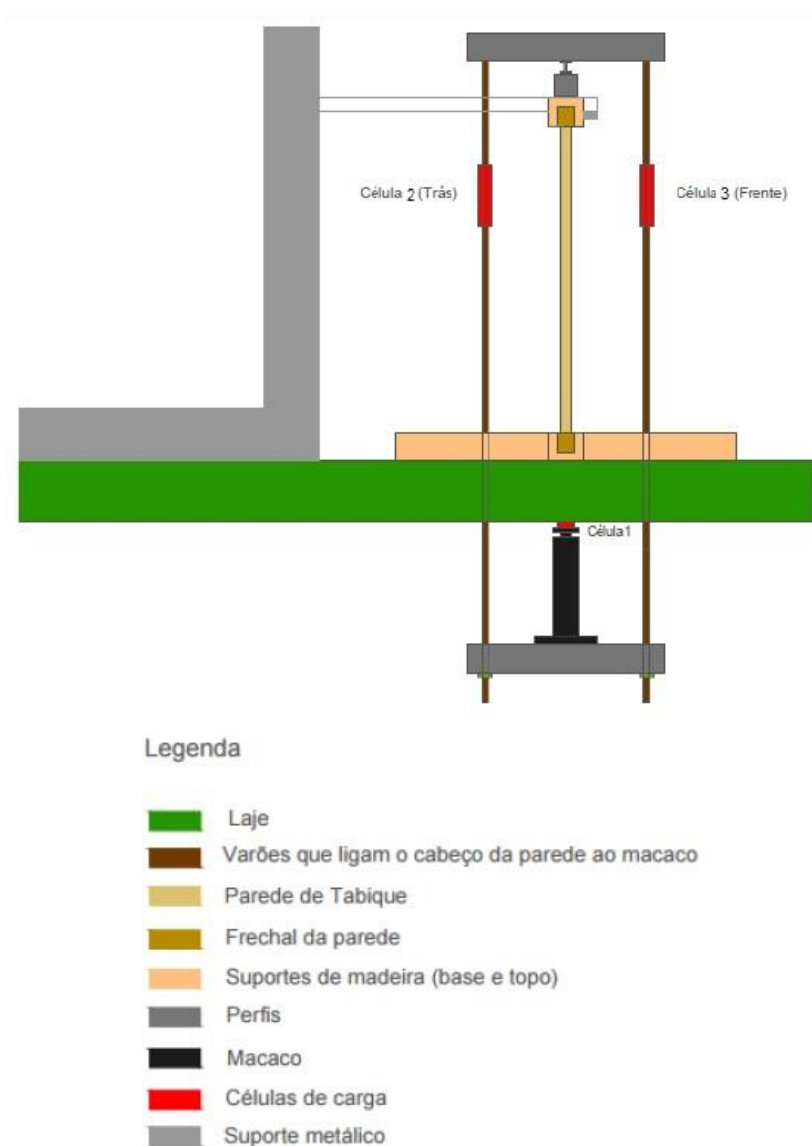


Figura 29 - Esquema do setup do ensaio da fase 1 (compressão)

As paredes vão ser então ensaiadas até instabilizarem, mas sem atingirem o colapso, pois serão alvo de mais ensaios posteriores. A carga é exercida pelo macaco hidráulico numa célula de carga, a qual mede a força que está a ser aplicada. Esta quando reage com o piso do laboratório, transmite a força para os dois varões que por sua vez aplicam a carga no frechal superior. Cada um destes varões dispõe ainda de um dispositivo que mede a força que cada um está a exercer, Figura 31.



Figura 30 - Macaco com a célula de carga no piso inferior do LESE

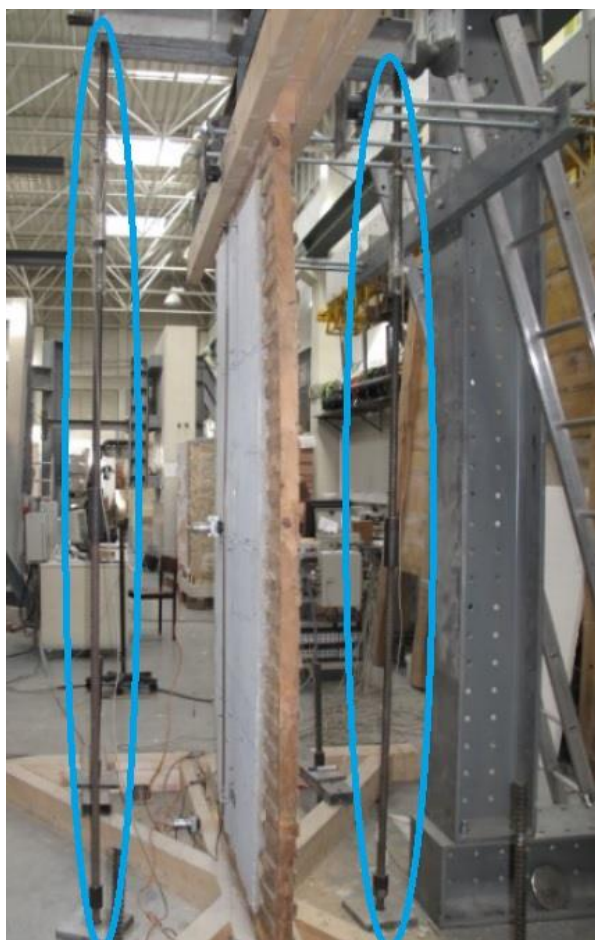


Figura 31 - Varões de transmissão de carga

Neste ensaio de carga, e de forma a perceber o comportamento das paredes, foram medidos os deslocamentos verticais no plano da parede (entre frechal superior e inferior e no painel da parede) e deslocamentos horizontais fora do plano da parede através de vários transdutores de deslocamentos (LVDTs). Foi medida ainda a rotação do frechal sobre os seus eixos, através de clinómetros e LVDTs posicionados no frechal de topo.

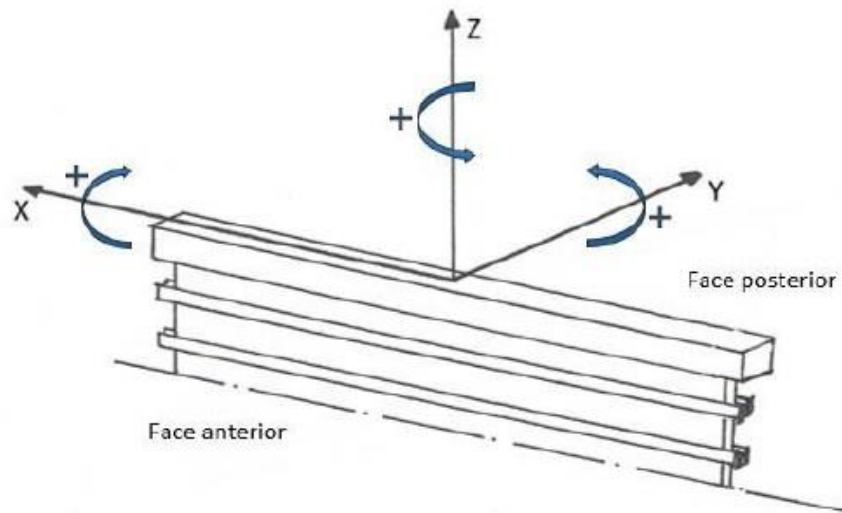


Figura 32 – Referencial utilizado na medição da rotação do frechal [12]

Os transdutores de deslocamentos utilizados para estes ensaios foram de 2 tipos: de mola e de fio, sendo que os de mola apresentam maior precisão que os segundos.

Para medição dos deslocamentos para fora do plano da parede foram utilizados sensores de fio, Figura 34, que se ligavam a uma estrutura fixa, Figura 33, de forma a termos uma referência externa para medição destes deslocamentos. Os sensores de fio foram ainda utilizados para a medição dos deslocamentos entre frechais. Os sensores de mola, mais precisos, foram utilizados para medir os deslocamentos no plano da parede, Figura 35.

Visto o posicionamento dos LVDTs nos ensaios à compressão não ser o mesmo para cada parede, os esquemas de monitorização serão particularizados no capítulo 5.



Figura 33 - Estrutura de referência para a medição dos deslocamentos para fora do plano



Figura 34 - Camarões onde ligam os LVDTs de fio



Figura 35 - Exemplo de LVDT de mola

4.2.2. SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO E CORTE

Os ensaios de compressão e corte nas paredes consistem na aplicação de uma força vertical constante (compressão) e uma força horizontal variável crescente (corte), aproveitando o *setup* utilizado na fase 1 de compressão e efetuando ligeiras adaptações (fases 2 e 3). Assim, para a aplicação da força horizontal foi utilizado um pórtico metálico que agarra o macaco hidráulico, funcionando como estrutura de reação, Figura 36 a Figura 38.

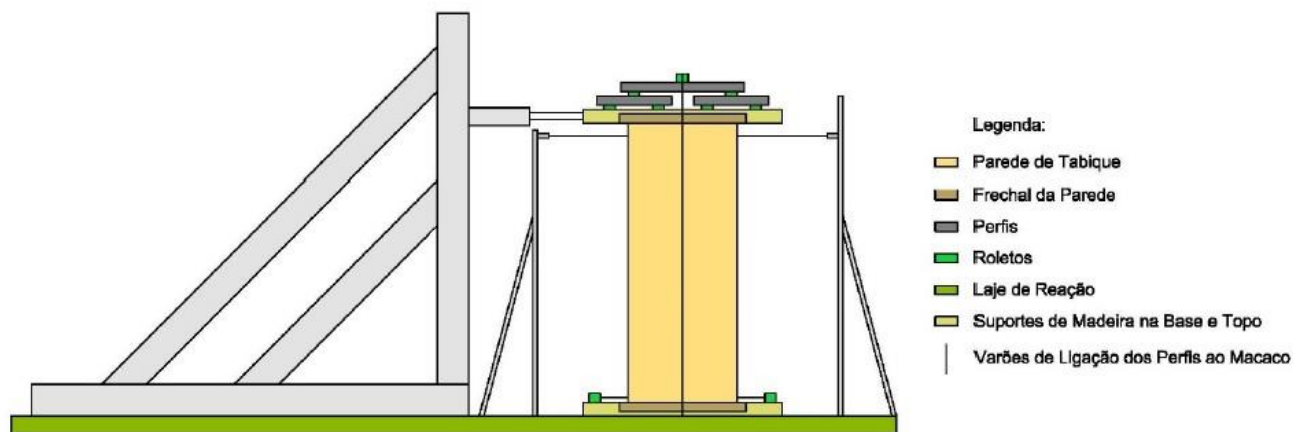


Figura 36 - Esquema do setup na fase 2 (compressão e corte) [10]



Figura 37 - Pórtico de reação da força horizontal de corte



Figura 38 - Macaco hidráulico que exerce a força horizontal de corte

A força é exercida pelo macaco e medida por uma célula de carga localizada na extremidade do êmbolo.

Neste ensaio de carga, e de forma a perceber o comportamento das paredes, foram medidos os deslocamentos verticais, horizontais e diagonais no plano da parede e os deslocamentos horizontais fora do plano da parede através de transdutores de deslocamentos (LVDTs). Foi medida ainda a rotação do frechal sobre o seu eixo, através de inclinómetros e LVDTs de fio posicionados no frechal de topo.

O tipo de LVDTs utilizados neste ensaio foram os mesmos que já tinham sido utilizados nos ensaios de compressão: de mola e de fio.

Assim como no ensaio de compressão, os LVDTs de mola apenas foram utilizados para medir os deslocamentos verticais no plano da parede e os LVDTs de fio foram utilizados para medir os restantes deslocamento

4.2.3. ALTERAÇÃO DO SETUP DO ENSAIO DE COMPRESSÃO E CORTE

Na última fase de ensaios (fase 4) houve uma pequena alteração no setup dos ensaios, nomeadamente na estrutura que impedia o deslocamento para fora do plano do frechal superior. Após os ensaios anteriores, conclui-se que este não estava a ser fixado propriamente e não tinha o comportamento desejado e, para corrigir esse comportamento, foi construída uma nova estrutura que melhor bloqueasse esse deslocamento.

Esta estrutura, feita com perfis metálicos, conduz os esforços resultantes do impedimento das deslocções para um pilar do laboratório, Figura 39 e Figura 40, garantindo uma maior rigidez a esta estrutura quando comparada com a utilizada nas fases anteriores.

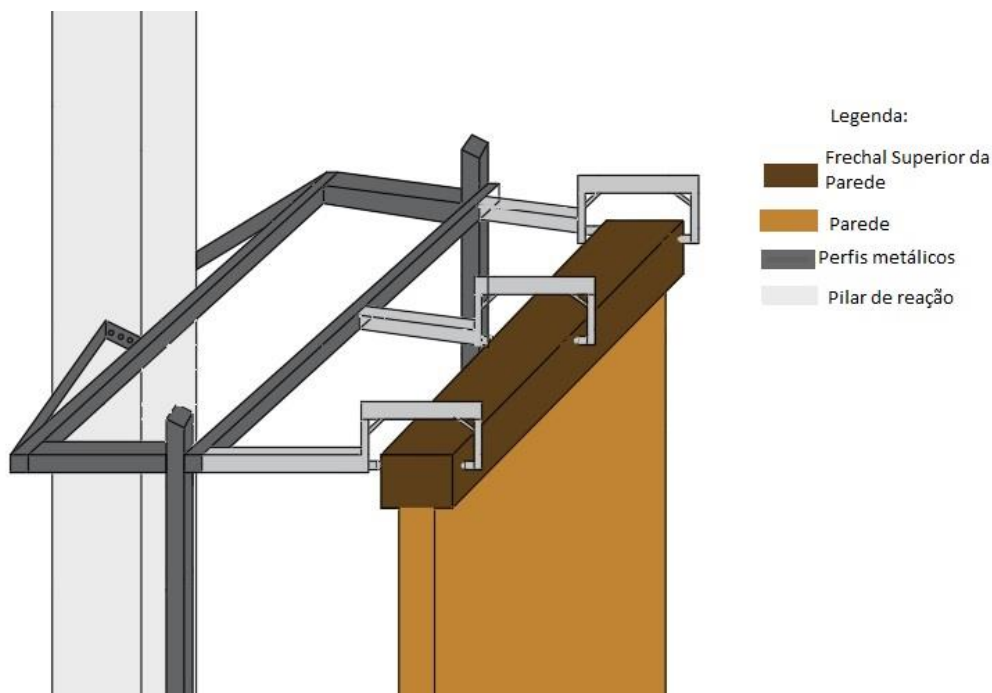


Figura 39 - Esquema do novo sistema de fixação do frechal superior

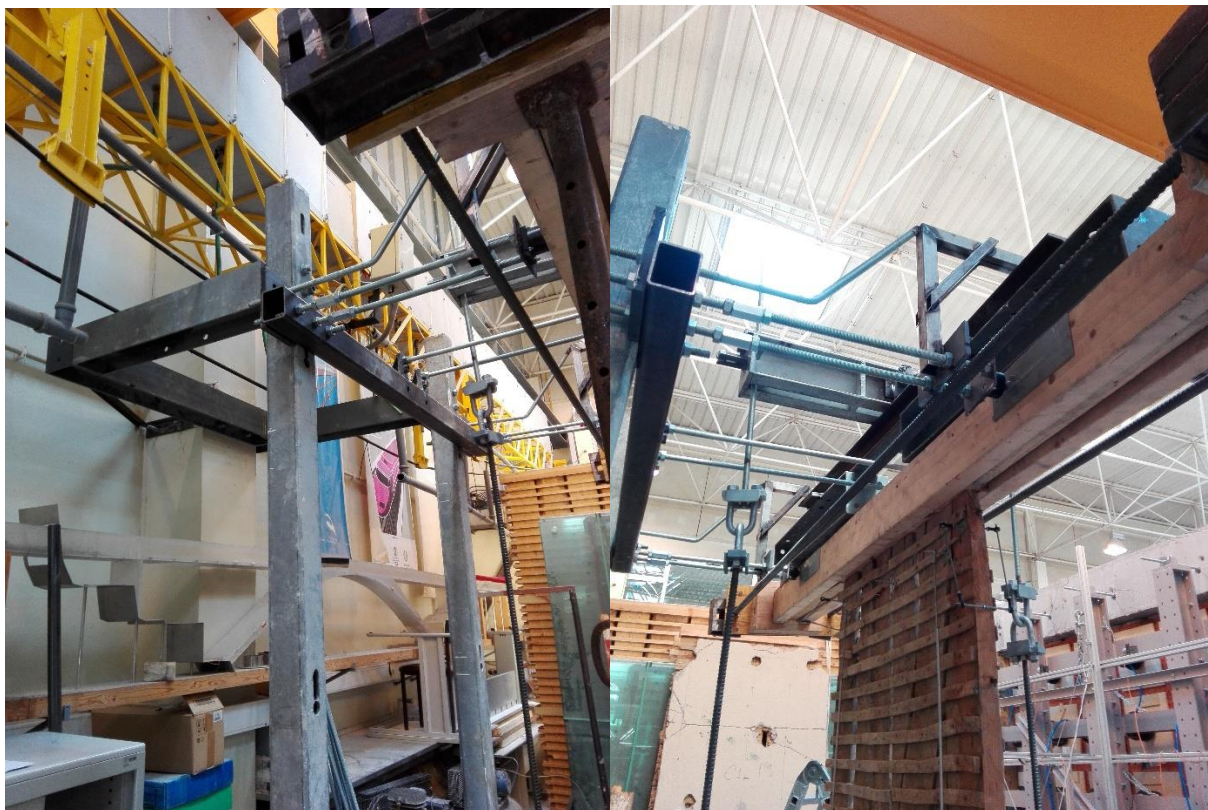


Figura 40 - Estrutura de suporte do frechal na fase 4

5

ANÁLISE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como o objetivo a análise dos resultados obtidos nos ensaios efetuados às paredes de tabique em estudo. Estas foram ensaiadas em 4 fases distintas e de forma sucessiva:

- Fase 1 – Ensaio experimental de força vertical variável de compressão crescente;
- Fase 2 – Ensaio experimental de força horizontal variável crescente, com compressão constante;
- Fase 3 – Ensaio experimental de força horizontal variável crescente, com compressão constante e parede reforçada;
- Fase 4 – Ensaio experimental de força horizontal variável crescente bidirecional, com compressão constante;

5.2. FASE 1 – COMPRESSÃO

Os objetivos deste ensaio passam por averiguar para cada parede o seu comportamento, a carga crítica de encurvadura, a rigidez e estimar o módulo de elasticidade da parede, tendo em conta as diferenças na sua constituição, nomeadamente:

- Serem compostas apenas por tábuas verticais, ou apresentarem uma tábua diagonal;
- A presença, ou não de revestimentos;
- O tipo de revestimento utilizado e a presença ou não da rede de galinheiro.

5.2.1. PAREDE 1

No ensaio desta parede foi estudado com maior detalhe o efeito do reboco no deslocamento vertical, visto se terem fixado medidores de deslocamento à argamassa, Figura 41. Foi ainda medido, para a força máxima de instabilização, o deslocamento máximo para fora do plano da parede e as rotações do frechal superior sobre os seus eixos.



Figura 41 - Pormenor da ligação dos LVDTs à argamassa e à madeira da Parede 1

O esquema da disposição dos LVDTs nesta parede é o ilustrado na Figura 42.

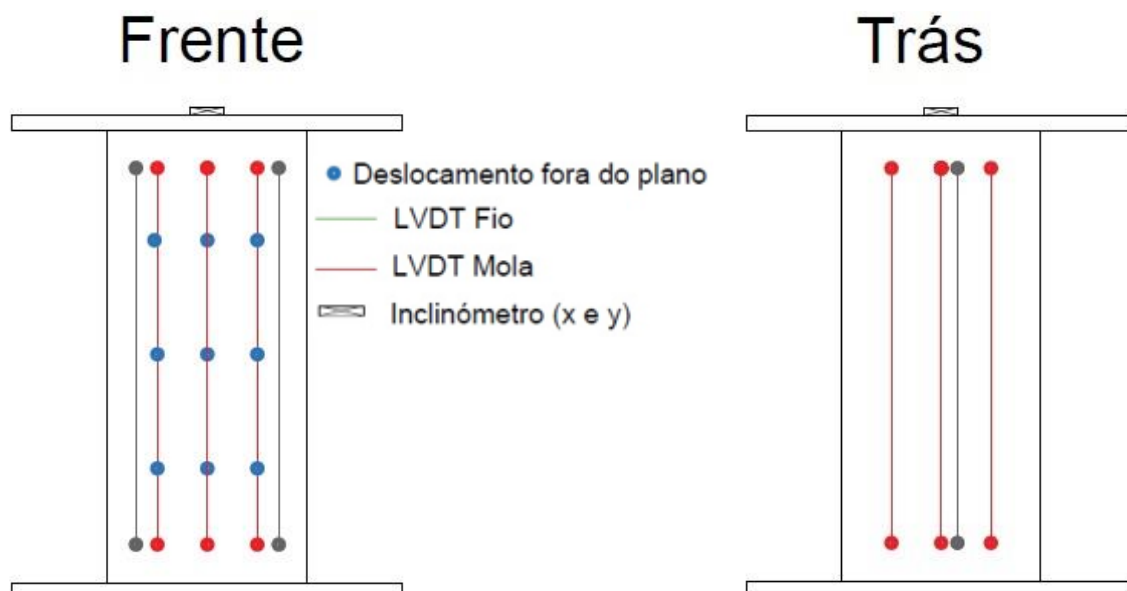


Figura 42 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 1, Fase 1

Temos então, para uma carga crítica de aproximadamente 100,6 kN/m, os respetivos gráficos de tração (Figura 44) e compressão (Figura 43) para cada face.

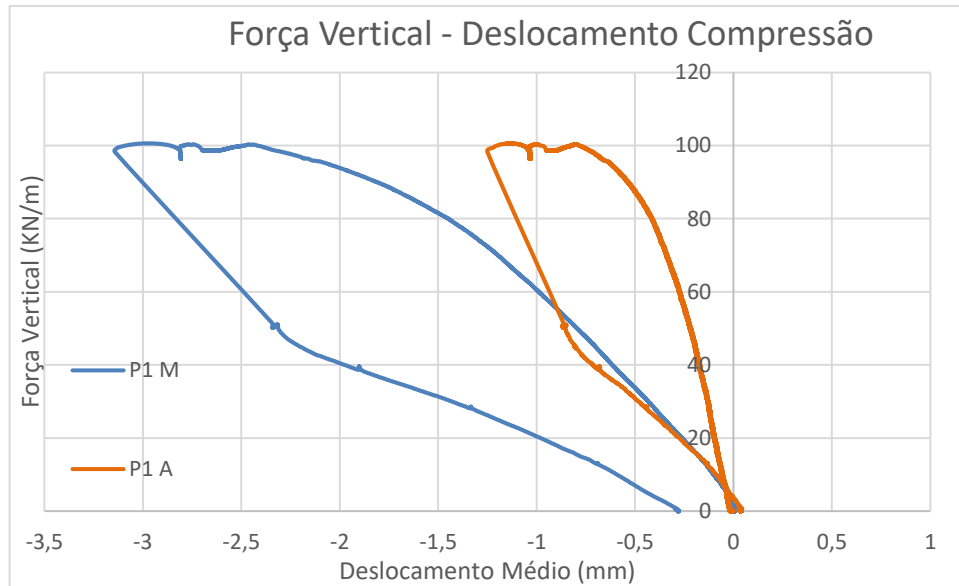


Figura 43 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)

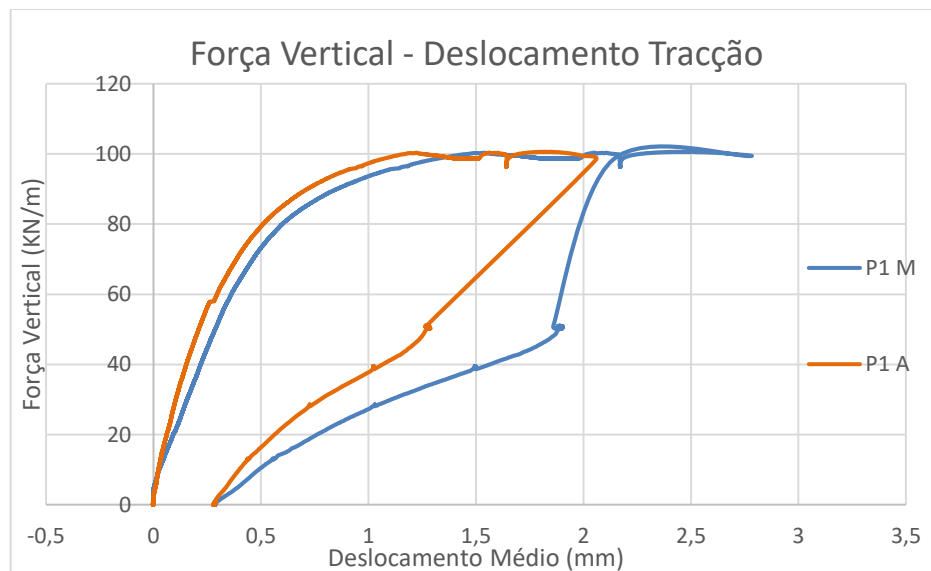


Figura 44 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)

Sendo que estes deslocamentos verticais foram medidos em cada face da parede, podemos obter o deslocamento médio da parede, fazendo a média entre o valor de tração e compressão, o que resulta no gráfico presente na Figura 45.

Foram ainda estimadas, para as curvas de força – deslocamento médio, nas fases elástica e plástica (nos momentos de carga e de descarga): a rigidez (K), calculada pela inclinação da reta, Figura 45, e o módulo de elasticidade tanto da parede como apenas das tábuas, com a equação (1). Correspondendo o momento de carga o intervalo onde se verifica o incremento de força e o momento de descarga ao intervalo em que a força decresce do máximo até 0.

$$E = \frac{\Delta F}{\frac{\Delta l}{h} * A} \quad (1)$$

ΔF – Intervalo de forças de compressão

Δl – Intervalo de deslocamentos

h – Altura total da parede

A – Área (total da parede ou apenas das tábuas verticais)

Assim para a parede 1 temos os valores de rigidez e de módulo de elasticidade presentes na Tabela 1.

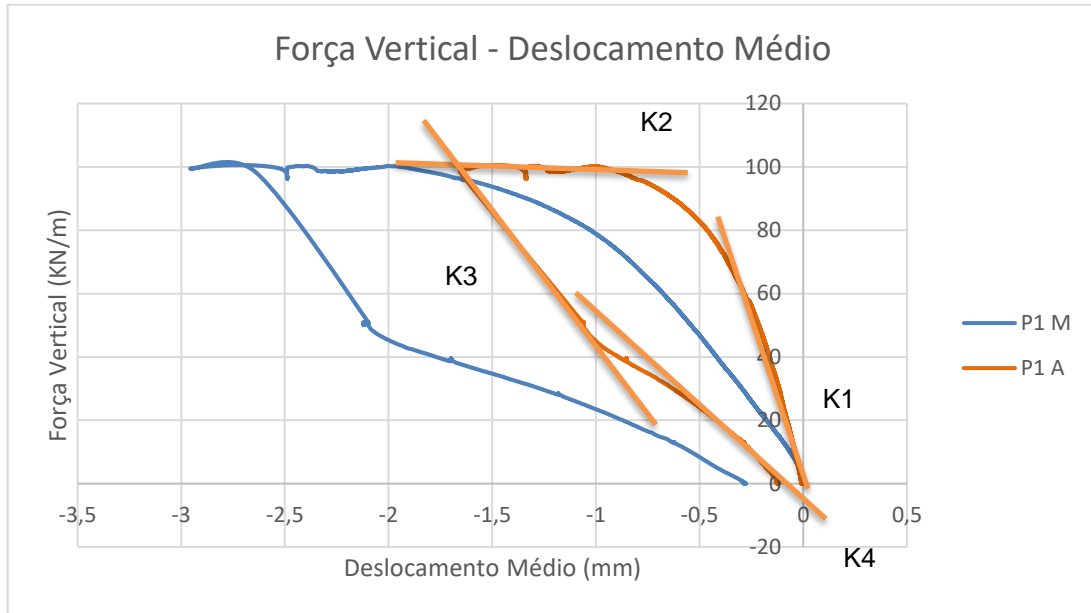


Figura 45 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 1 (deslocamentos medidos na Madeira e na Argamassa)

Podemos concluir então, pelos gráficos da Figura 43 e Figura 45, que os deslocamentos medidos na madeira têm um valor superior aos valores medidos na argamassa quando a face em estudo está submetida a um esforço de compressão, sendo que para isso contribui o maior distanciamento da argamassa em relação ao centro de gravidade das tábuas. Já quando a face da parede apresenta um esforço de tração, a diferença é diminuta. Como podemos verificar pela Figura 44 ambas as curvas apresentam uma rigidez semelhante.

Tabela 1 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade da Parede 1

		P1	
		M	A
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	86,8	188,3
	Rigidez descarga (KN/mm)	97,8	90,0
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	6,9	-
	E - parede carga (KN/mm ²)	-	3,9
	E - tábuas des-carga (KN/mm ²)	7,7	-
	E - parede des-carga (KN/mm ²)	-	1,9
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	7,2	19,6
	Rigidez descarga (KN/mm)	22,2	43,3
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	0,6	-
	E - parede carga (KN/mm ²)	-	0,4
	E - tábuas des-carga (KN/mm ²)	1,8	-
	E - parede des-carga (KN/mm ²)	-	0,9

No que toca à rotação do frechal superior, Figura 46, este apresenta rotação apenas segundo o eixo x de cerca de 4 graus, Figura 47. A rotação sobre o eixo z não foi medida porque não foram dispostos medidores de deslocamento para fora do plano no frechal superior.

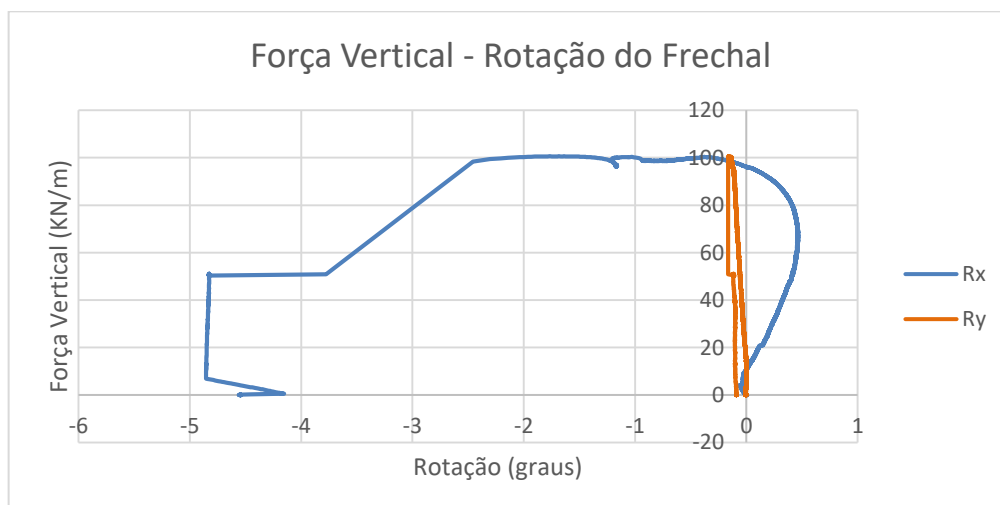


Figura 46 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 1



Figura 47 - Rotação do frechal superior da Parede 1

Para a análise do seu comportamento para fora do plano, foram dispostos os LVDTs em três alinhamentos verticais e três alinhamentos horizontais Figura 42. Visto para o mesmo nível terem apresentado comportamento similar, com deslocamentos da mesma ordem de grandeza, foi traçado um gráfico força – deslocamento médio por alinhamento vertical, de forma a ilustrar a deformada total da parede. São ainda apresentadas neste gráfico deformadas para sucessivos valores de carga vertical atuante, com o intuito de ilustrar a deformada ao longo do ensaio.

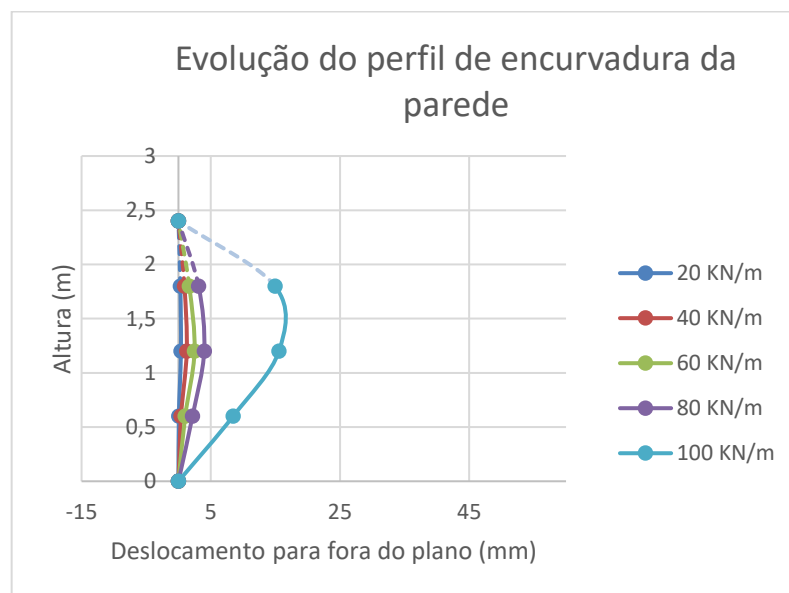


Figura 48 - Gráfico Força - Deslocamento médio para fora do plano da Parede 1

Por observação da Figura 48, constatamos que a parede 1 apresenta uma barriga não simétrica, com um deslocamento de aproximadamente 17mm para uma força máxima de 100KN/m. É de notar que o valor do deslocamento no topo do perfil transversal não foi de 0mm (linha a tracejado). Porém por falta de informação quanto a esta medida, foi representado desta forma no gráfico.

5.2.2. PAREDE 2

Na parede 2 foram medidos os deslocamentos verticais, apenas num alinhamento central como ilustra a Figura 49, os deslocamentos para fora do plano da parede e ainda as rotações do frechal superior sobre os seus eixos.

O esquema da disposição dos LVDTs nesta parede é o ilustrado na Figura 49.

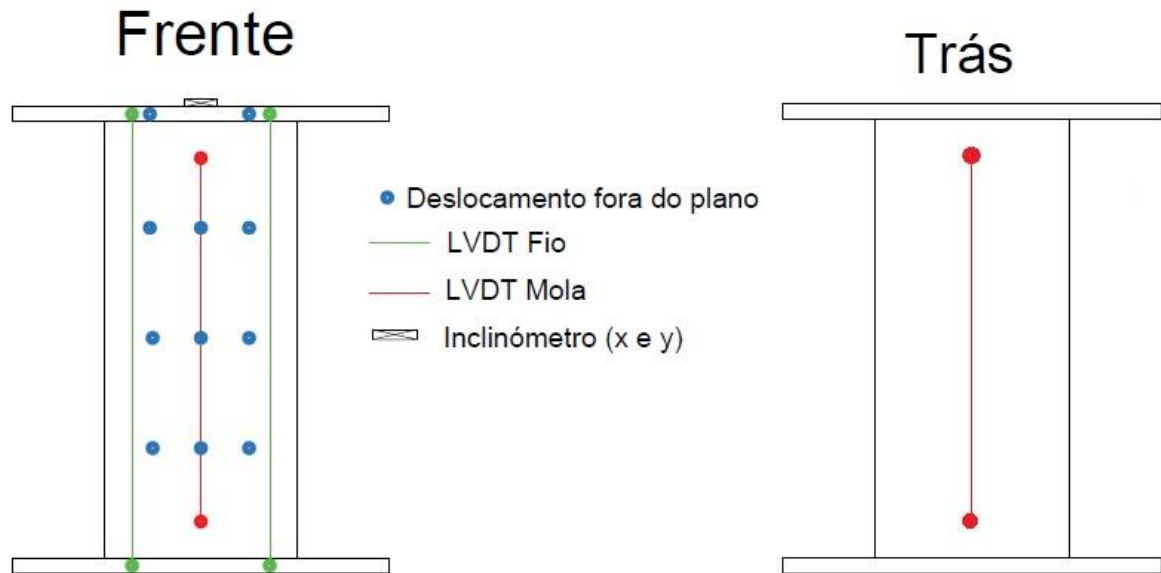


Figura 49 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 2, Fase 1

Temos então, para uma carga crítica de aproximadamente 115KN/m, os respetivos gráficos de tração (Figura 51) e compressão (Figura 50) para cada face.

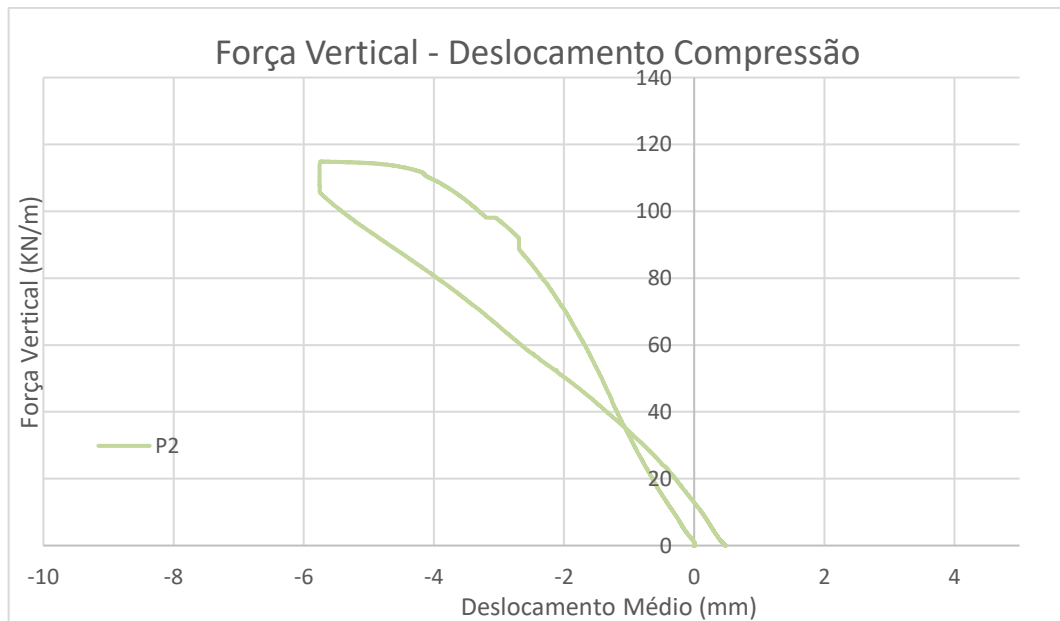


Figura 50 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 2

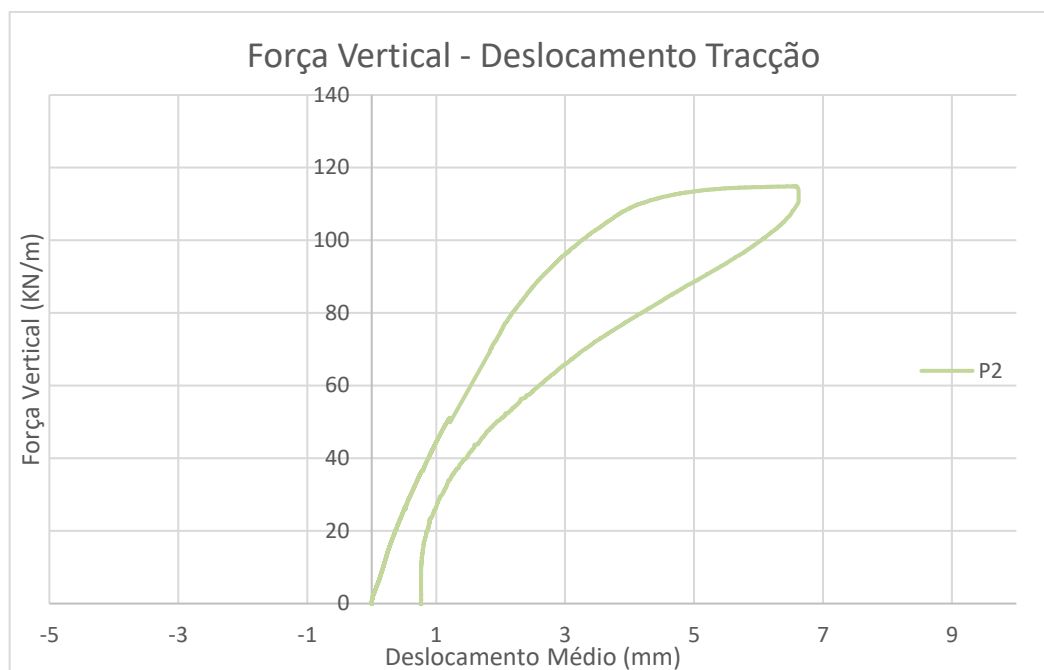


Figura 51 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 2

Fazendo uso do mesmo raciocínio utilizado para a Parede 1, temos na Figura 52 o gráfico que relaciona o deslocamento médio da Parede 2 com os diferentes valores de carga vertical aplicada.

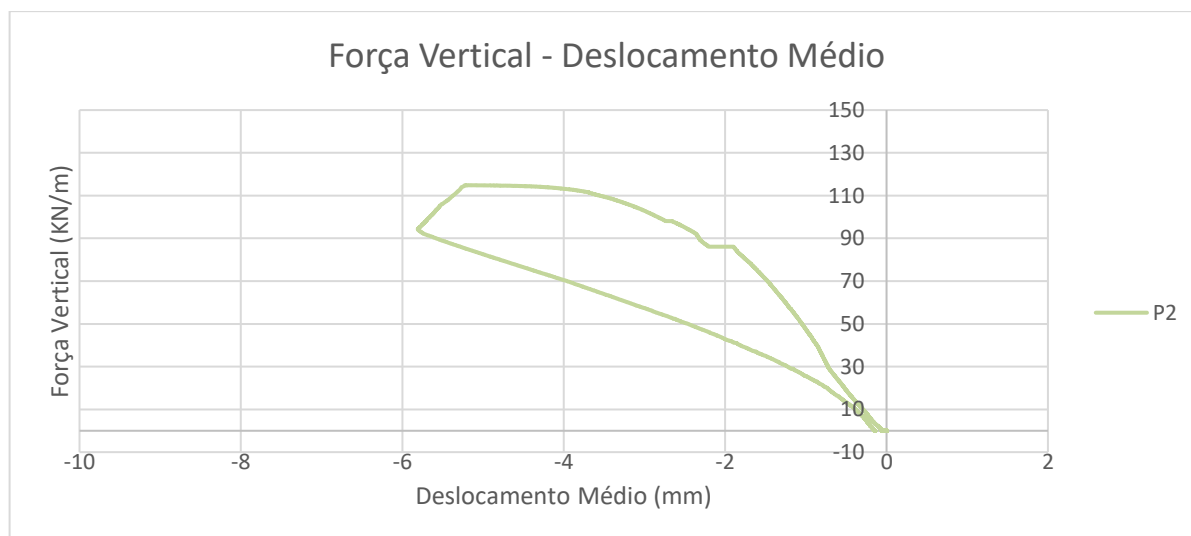


Figura 52 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 2

Os valores de rigidez e de módulo de elasticidade da parede 2 são os estimados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da parede 2

P2		
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	58,9
	Rigidez descarga (KN/mm)	14,5
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	4,4
	E - parede carga (KN/mm ²)	1,9
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)	1,1
	E - parede descarga (KN/mm ²)	0,5
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	5,0
	Rigidez descarga (KN/mm)	-
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	0,4
	E - parede carga (KN/mm ²)	0,2
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)	-
	E - parede descarga (KN/mm ²)	-

Quanto ao movimento do frechal superior, como podemos observar pela Figura 53, este apresenta uma rotação segundo o eixo x de aproximadamente 4 graus. Quanto à rotação sobre o eixo y e z é desprezável.

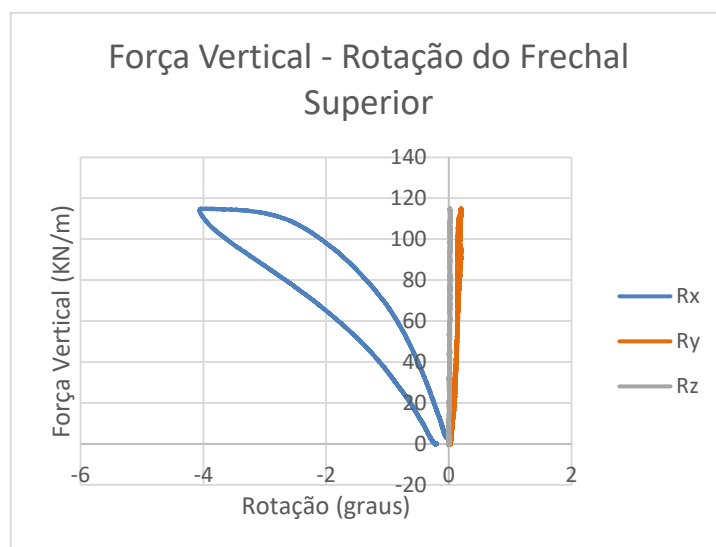


Figura 53 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 2

Para a análise do comportamento da parede para fora do plano foi feita a mesma análise que para a parede 1.

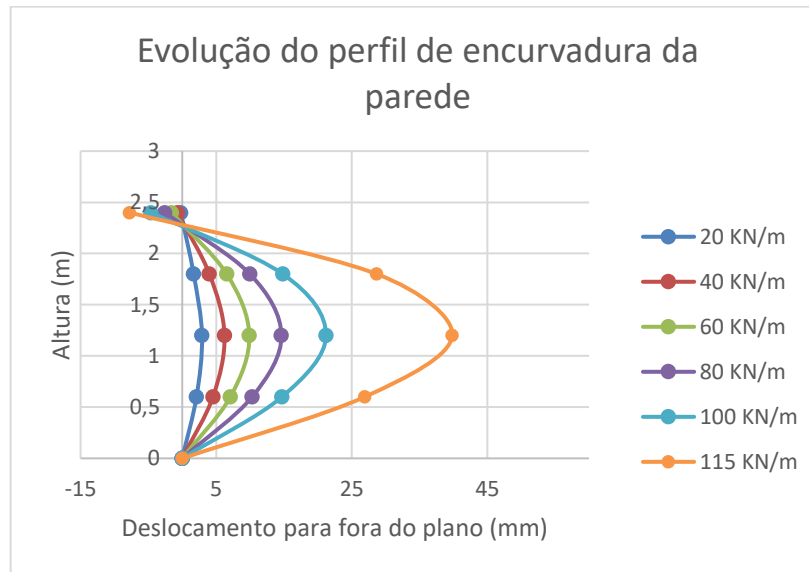


Figura 54 - Perfil transversal da parede 2



Figura 55 - Deformada da Parede 2

Por observação da Figura 54 e Figura 55, constatamos que a parede 2 apresenta uma barriga não simétrica, com um deslocamento de aproximadamente 39mm para uma força máxima de 115KN/m.

5.2.3. PAREDE 3

Para a parede 3 foram medidos: os deslocamentos verticais, apenas num alinhamento central, os deslocamentos para fora do plano da parede e as rotações do frechal superior sobre os seus eixos -Figura 56 . Para esta parede foi ainda efetuada uma leitura de deslocamentos específica, com o intuito de se perceber o comportamento da ligação de uma tábua vertical à tábua diagonal como demonstra o esquema da Figura 56 e Figura 57.

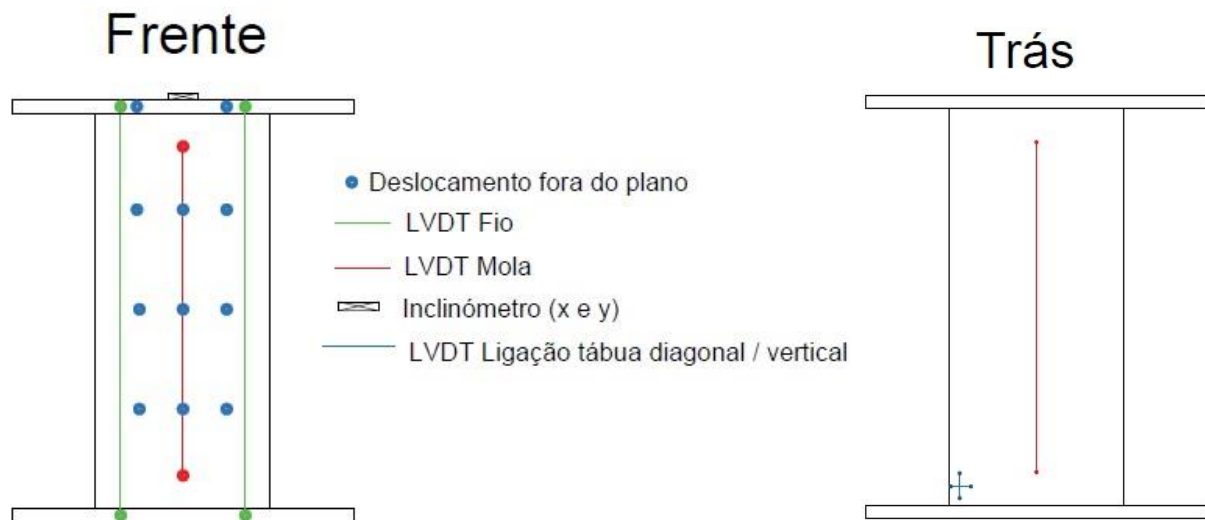


Figura 56 - Esquema disposição dos LVDTs da Parede 3, Fase 1



Figura 57 - LVDT Complementar

Temos então, para uma carga crítica de aproximadamente 73KN/m, os respectivos gráficos de tração (Figura 58) e compressão (Figura 59) para cada face.

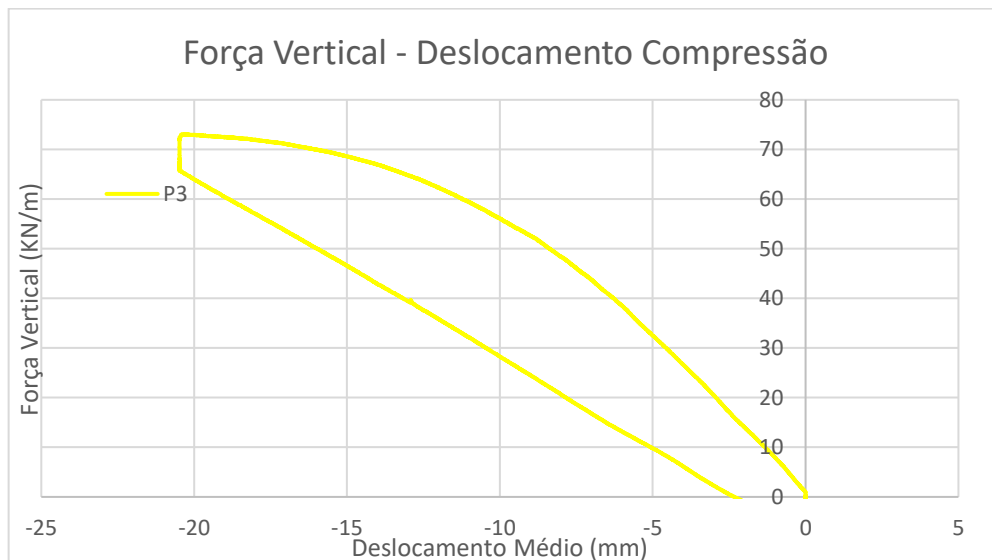


Figura 58 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida da Parede 3

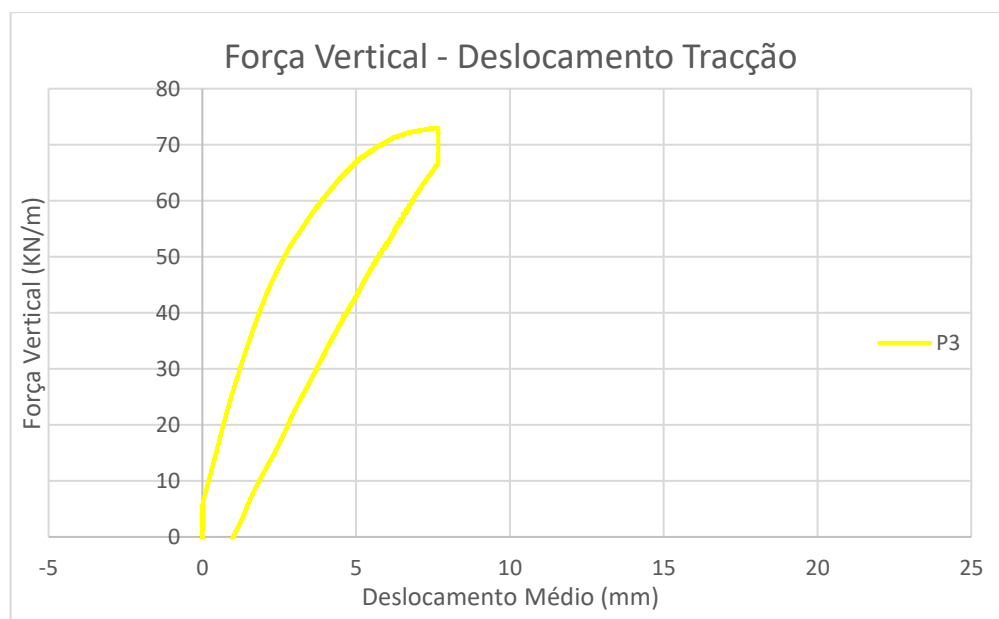


Figura 59 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada da Parede 3

Assim, fazendo uso dos mesmos e da análise efetuada para as paredes anteriores, temos então o gráfico da Figura 60 que demonstra o mostra o deslocamento médio da parede 3.

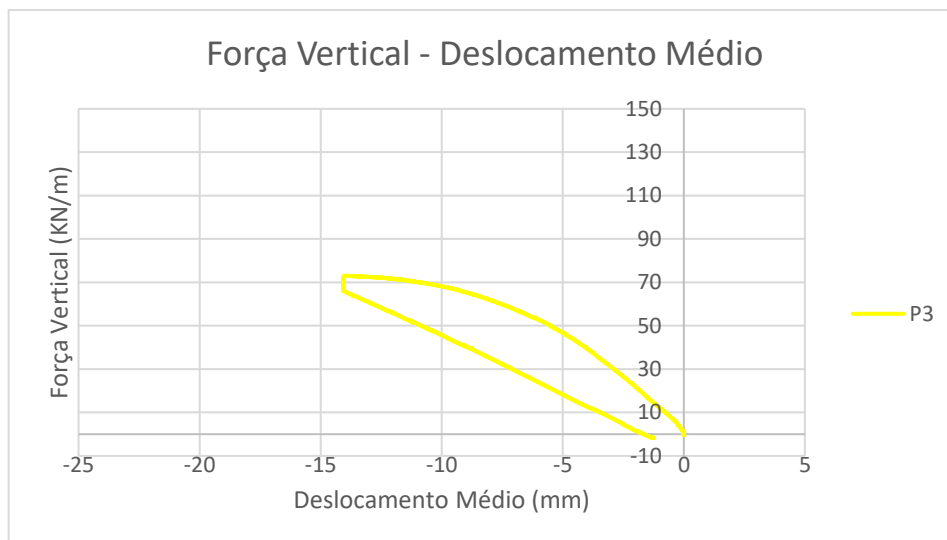


Figura 60 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 3

Os valores de rigidez e de módulo de elasticidade da parede 3 são os estimados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da parede 3

P3	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	9,5
	Rigidez descarga (KN/mm)
	5,6
	E - tábuas carga (KN/mm ²)
	0,6
Plástico	E - parede carga (KN/mm ²)
	0,3
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)
	0,4
	E - parede descarga (KN/mm ²)
	0,2
	Rigidez carga (KN/mm)
	1,4
	Rigidez descarga (KN/mm)
	-
	E - tábuas carga (KN/mm ²)
	0,1
	E - parede carga (KN/mm ²)
	0,1
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)
	-
	E - parede descarga (KN/mm ²)
	-

Quanto à medição complementar que foi feita na ligação da tábuia diagonal com a vertical, vemos pela Figura 61, que esta horizontalmente não teve qualquer deslocamento, e na direção vertical teve um deslocamento de 10mm no sentido da compressão, o que é justificado pela união da fresta entre as tábuas.

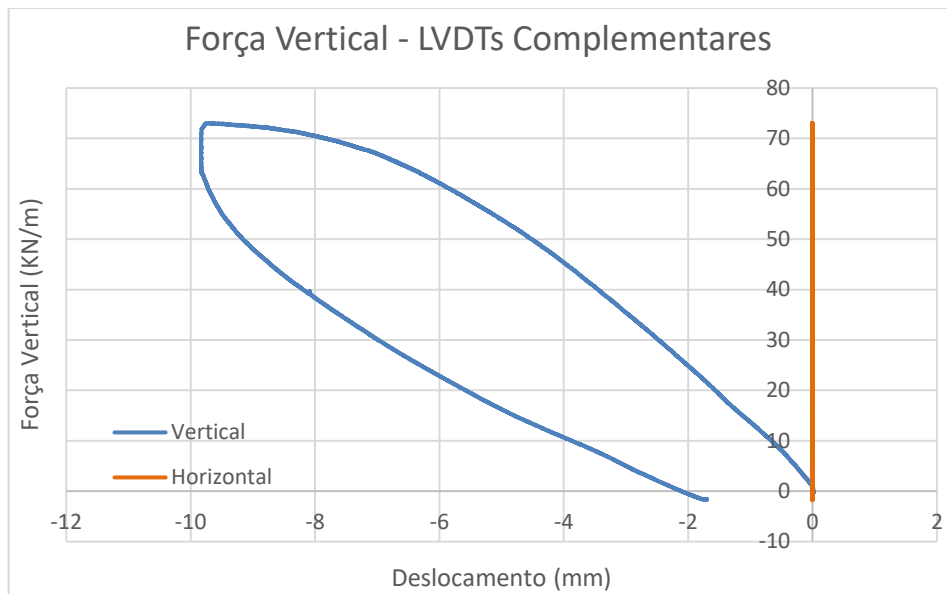


Figura 61 - Gráfico Força - Deslocamento da Ligação da tábuia diagonal

Analisando agora o movimento do frechal superior, concluímos, tal como nas outras paredes, que este apenas tem rotação segundo o eixo x e com um valor de 4 graus - Figura 62.

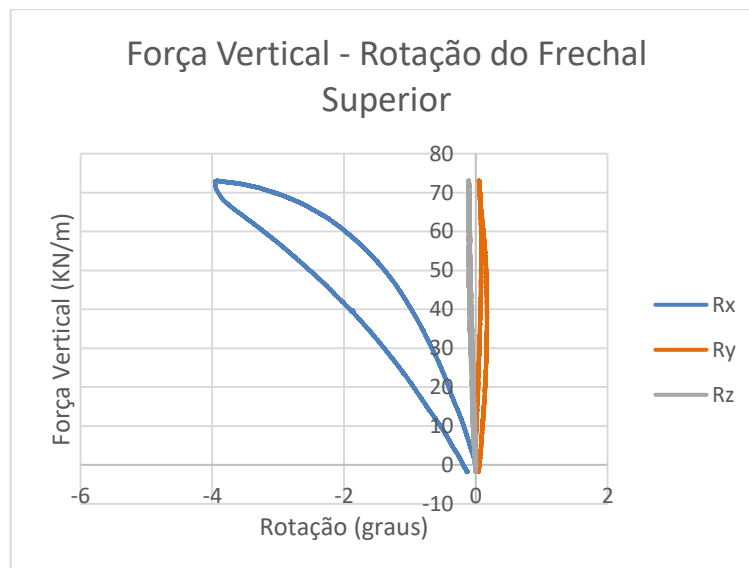


Figura 62 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3

Quanto ao seu comportamento para fora do plano, foi feita uma análise igual à realizada para as outras paredes.

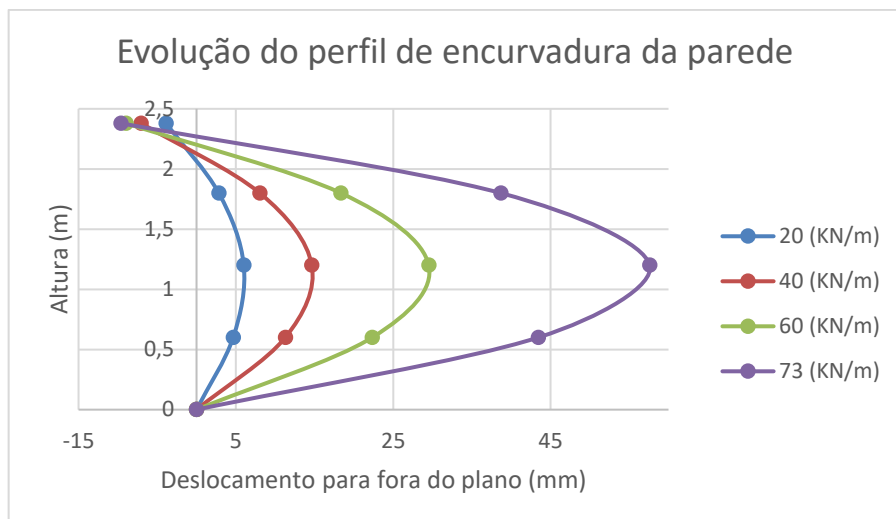


Figura 63 - Perfil transversal da parede 3



Figura 64 - Deformada da Parede 3

Esta parede apresenta então uma barriga não simétrica como vemos pela Figura 63, com um deslocamento de aproximadamente 58mm para a força máxima de encurvadura de aproximadamente 73KN/m, Figura 64.

5.2.4. PAREDE 4

Por fim, para a parede 4 foram também medidos: os deslocamentos verticais, apenas num alinhamento central, os deslocamentos para fora do plano da parede e as rotações do frechal superior sobre os seus eixos, como demonstra o esquema da Figura 65.

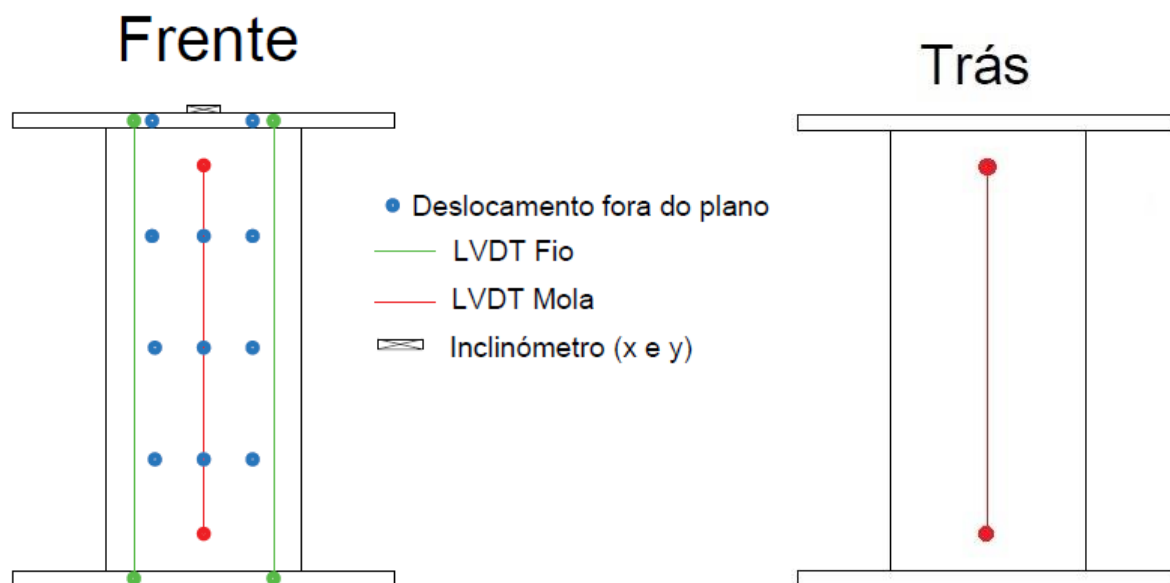


Figura 65 - Esquema disposição dos LVDTs na Parede 4, Fase 1

Assim, para uma carga crítica de aproximadamente 150KN/m temos os seguintes gráficos de compressão e tração para cada face, representados, respetivamente, na Figura 66 e Figura 67.

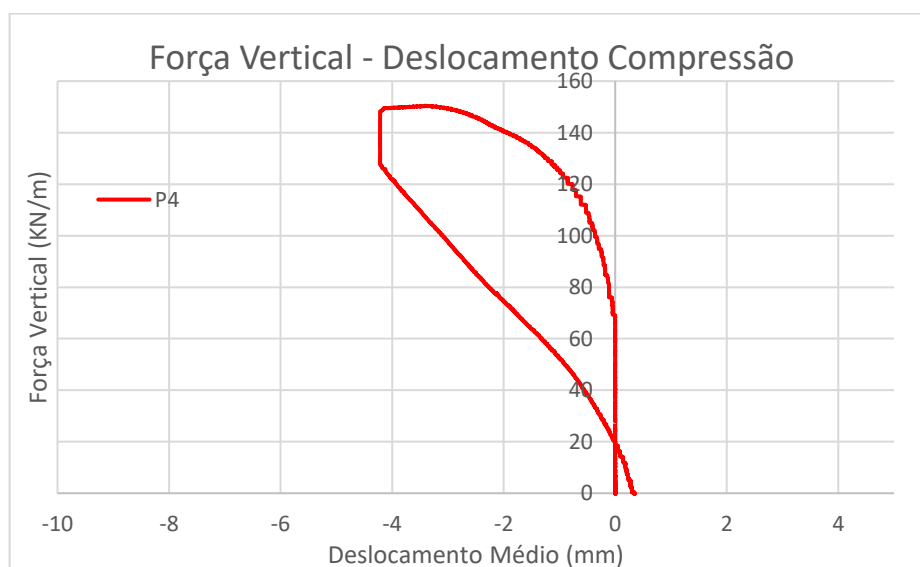


Figura 66 - Gráfico Força - Deslocamento na face comprimida Parede 4

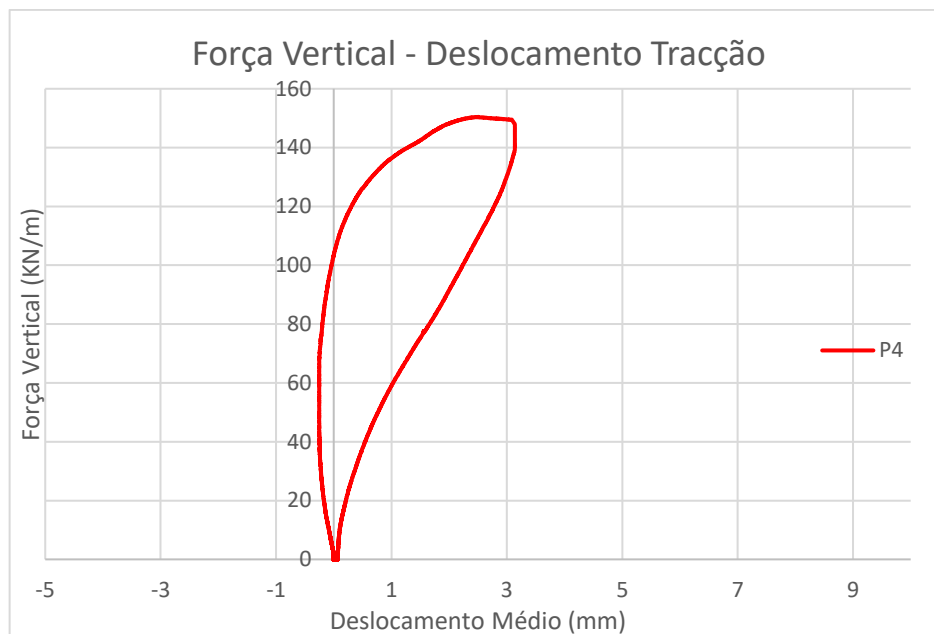


Figura 67 - Gráfico Força - Deslocamento na face tracionada Parede 4

Seguindo o mesmo raciocínio das restantes paredes para o cálculo do deslocamento médio, temos o gráfico apresentado na Figura 68.

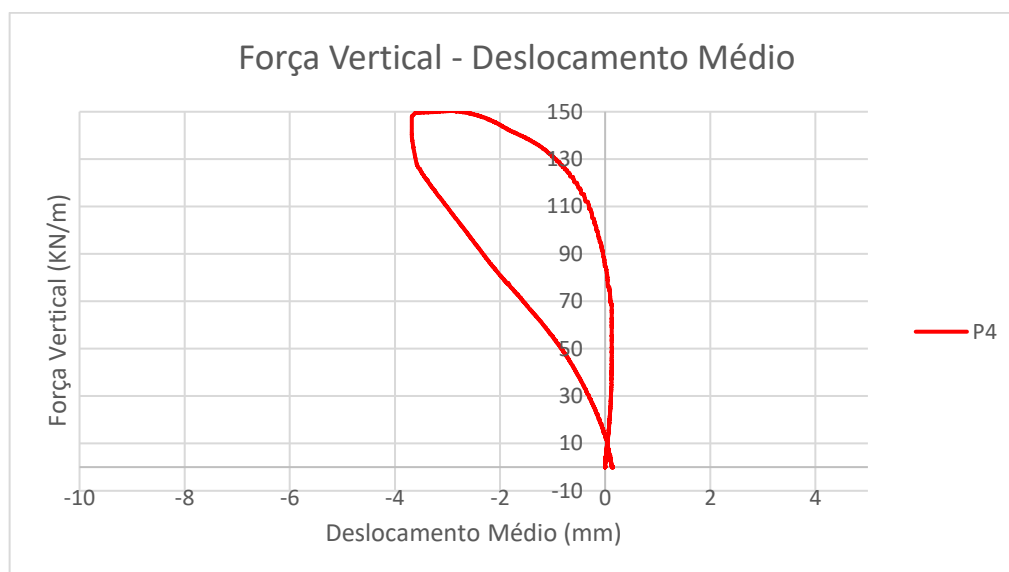


Figura 68 - Gráfico Força - Deslocamento médio vertical da Parede 4

Os valores de rigidez e de módulo de elasticidade da parede 4 são os estimados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) da Parede 4

P4	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	-
	Rigidez descarga (KN/mm)
	27,5
	E - tábuas carga (KN/mm ²)
	-
Elástico	E - parede carga (KN/mm ²)
	-
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)
	2,4
	E - parede descarga (KN/mm ²)
	1,0
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)
	2,7
	Rigidez descarga (KN/mm)
	-
	E - tábuas carga (KN/mm ²)
	0,2
Plástico	E - parede carga (KN/mm ²)
	0,1
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)
	-
Plástico	E - parede descarga (KN/mm ²)
	-

Quando analisada a rotação do frechal superior desta parede através do gráfico da Figura 69, concluímos que este também só sofre uma rotação de cerca de 2 graus sobre o eixo x. Podendo considerar-se a rotação sobre o eixo y desprezável.

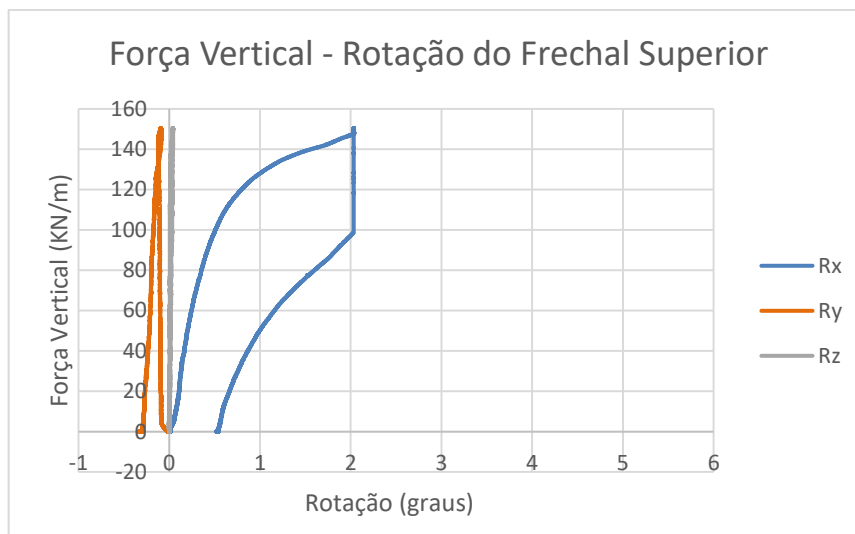


Figura 69 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 4

Quanto ao seu comportamento para fora do plano, esta parede apresenta uma barriga não simétrica como vemos pela Figura 70, com um deslocamento de aproximadamente 25mm para a força máxima de encurvadura.

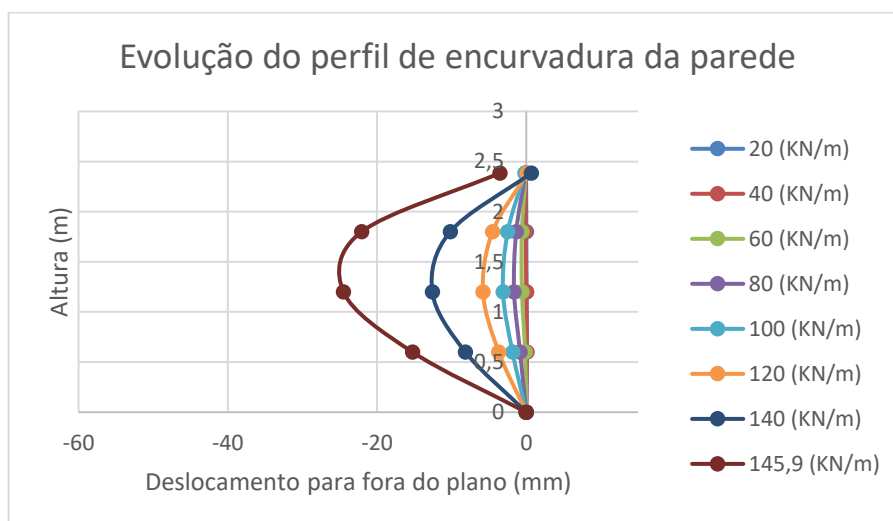


Figura 70 - Perfil transversal da parede 4

A parede 4 apresenta uma barriga não simétrica como vemos pela Figura 70, com um deslocamento de aproximadamente 24mm para a força máxima de encurvadura de aproximadamente 150 KN/m. É de salientar ainda o deslocamento do frechal no topo desta parede, tendo este um valor de 2,5mm.

5.2.5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS 4 PAREDES

Fazendo agora uma comparação entre todas as paredes estudadas à compressão, pela Figura 71, podemos verificar que a parede 4 é a que apresenta a maior carga crítica e a maior rigidez, visto necessitar de valores de carga mais elevados para atingir o regime plástico e, por consequência, tem um deslocamento médio menor para a mesma força aplicada. Este comportamento pode ser justificado pelo tipo de argamassa utilizado no revestimento, sendo esta uma argamassa de cimento que confere maior rigidez à parede.

Por outro lado, a parede 3 é a que apresenta a menor carga de encurvadura e o maior deslocamento médio. Esta parede tem um comportamento completamente distinto das outras paredes ensaiadas. Tal poderá ser justificado pelo pior estado da madeira que lhe confere uma rigidez menor e assim um comportamento mais deformável, justificando deslocamentos tão elevados.

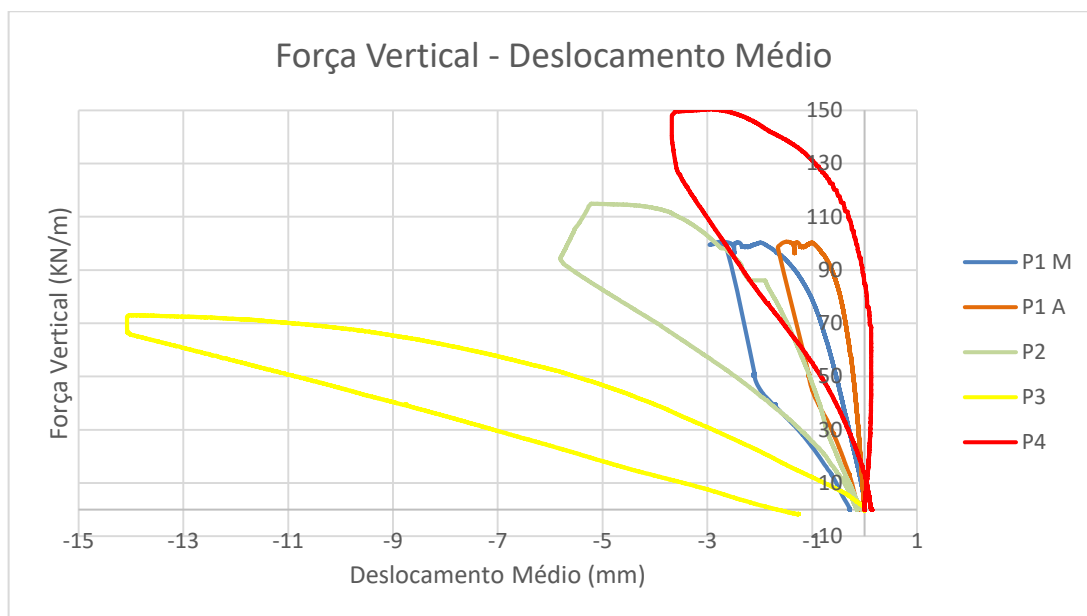


Figura 71 - Gráfico Força – Deslocamento, de todas as paredes

Apresenta-se na Tabela 5 a compilação das rigidezes e módulos de elasticidade de todas as paredes.

Tabela 5 - Valores da rigidez e módulo de elasticidade (E) de todas as paredes

		P1			P2	P3	P4
		M	A	Média			
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	86,8	188,3	137,55	58,9	9,5	-
	Rigidez descarga (KN/mm)	97,8	90	93,9	14,5	5,6	27,5
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	6,9	-	6,9	4,4	0,6	-
	E - parede carga (KN/mm ²)	-	3,9	3,9	1,9	0,3	-
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)	7,7	-	7,7	1,1	0,4	2,4
	E - parede descarga (KN/mm ²)	-	1,9	1,9	0,5	0,2	1
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	7,2	19,6	13,4	5	1,4	2,7
	Rigidez descarga (KN/mm)	22,2	43,3	32,75	-	-	-
	E - tábuas carga (KN/mm ²)	0,6	-	0,6	0,4	0,1	0,2
	E - parede carga (KN/mm ²)	-	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1
	E - tábuas descarga (KN/mm ²)	1,8	-	1,8	-	-	-
	E - parede descarga (KN/mm ²)	-	0,9	0,9	-	-	-

5.3. FASE 2 – COMPRESSÃO E CORTE

Os objetivos desta fase de ensaios passam por averiguar, para cada parede, o seu comportamento no plano ao corte, a força máxima de corte, a sua rigidez para a força de corte e o levantamento das tábuas na ligação ao frechal inferior, tendo em conta as diferenças na constituição das paredes, nomeadamente:

- Serem compostas apenas por tábuas verticais, ou conterem uma tábua diagonal;
- A presença, ou não de revestimentos;
- O tipo de revestimentos utilizado e a presença, ou não da rede de galinheiro;

Foram dispostos vários dispositivos para a medição dos deslocamentos necessários para a análise destas paredes. O esquema da disposição dos LVDTs é o ilustrado na Figura 72, e foi o mesmo para todas as paredes nesta fase.

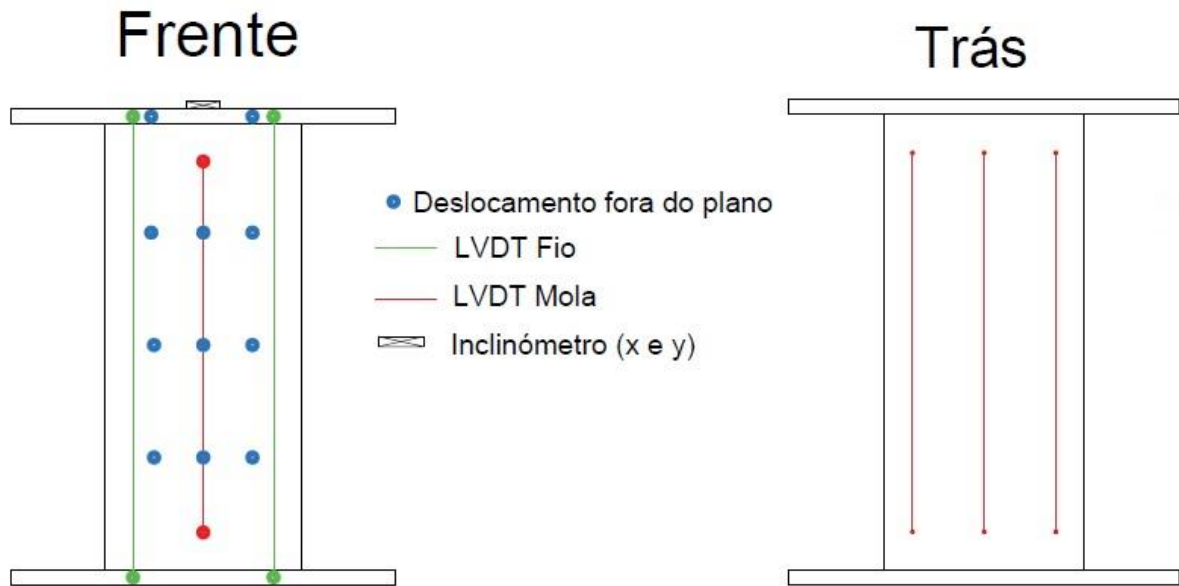


Figura 72 – Esquema disposição geral dos LVDTs da Fase 2

5.3.1. PAREDE 1

Para a determinação do deslocamento médio da parede, foi feita a diferença entre os LVDTs horizontais no topo e base em cada extremidade da parede e de seguida a média da diferença destes valores, de forma a se obter o deslocamento médio total da parede. Este é apresentado na Figura 73 em função da força horizontal. Assim para uma força máxima de corte de 4,9 kN a parede apresentou um deslocamento médio de cerca de 23mm.

Utilizando o mesmo método para o cálculo da rigidez das paredes à compressão, foi assim calculada a rigidez para as mesmas paredes ao corte no plano, tanto na fase de carga como de descarga e para ambos os regimes (elástico e plástico), Tabela 6.

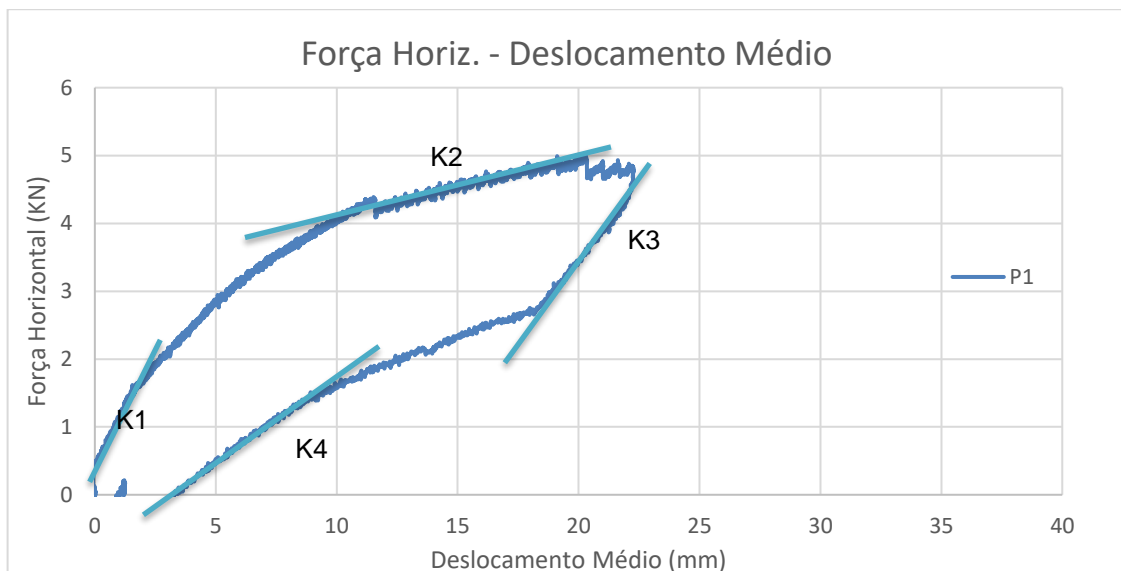


Figura 73 - Gráfico Força Horizontal - Deslocamento Médio da Parede 1

Tabela 6 - Valores da rigidez ao corte da Parede 1

P1	
K	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,24
	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,23
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,08
	Rigidez descarga (KN/mm)
	1

Visto que irá ser aplicada uma força horizontal na parede, esta pode levar à rotação e levantamento da parte inferior da parede em relação ao frechal. Para aferir o valor do seu levantamento foi feita a diferença entre o deslocamento medido entre frechais e o deslocamento medido no painel da parede, o que resultou no gráfico presente na Figura 74, isto do lado da parede onde está a atuar a força. Assim, para a força máxima de corte, o valor de levantamento das tábuas verticais no frechal inferior foi de cerca de 6,2mm.

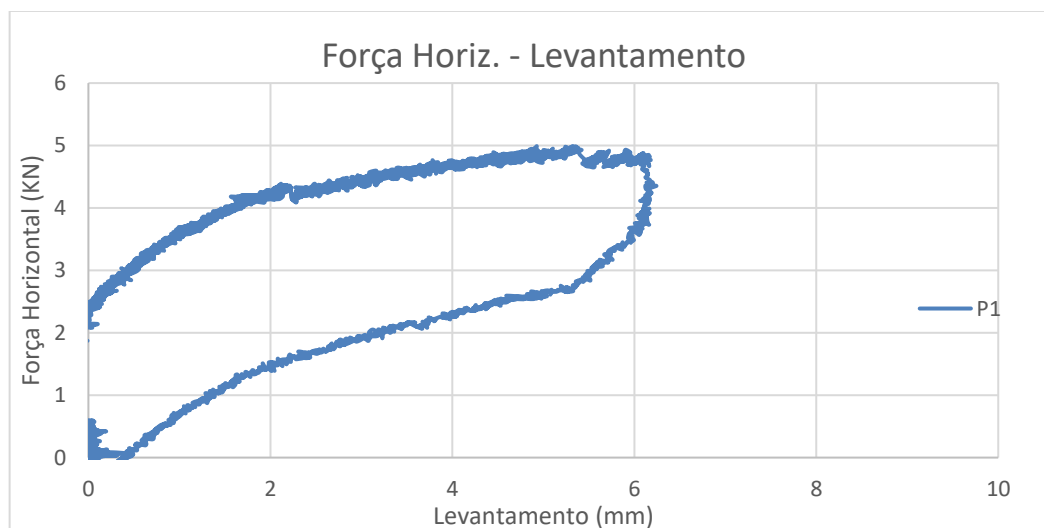


Figura 74 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 1

Assim como na fase 1, foi estudado o movimento do frechal superior. Porém, como podemos ver pelo gráfico da Figura 75, este não apresenta valores significativos de rotação em qualquer um dos seus eixos.

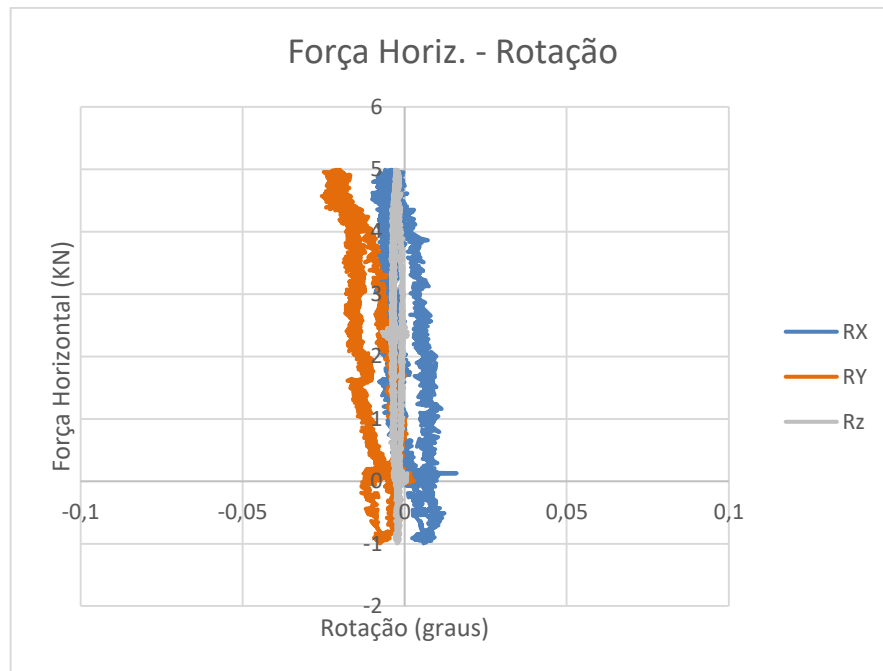


Figura 75 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 1

Com o objetivo de observar o comportamento da parede quando sujeita à força horizontal de corte no plano, foram estudados os movimentos dos transdutores de deslocamento dispostos na diagonal em função do deslocamento médio da parede e, com isto, verificar se a parede apresenta movimento de corpo rígido, ou distorção por corte, Figura 76.

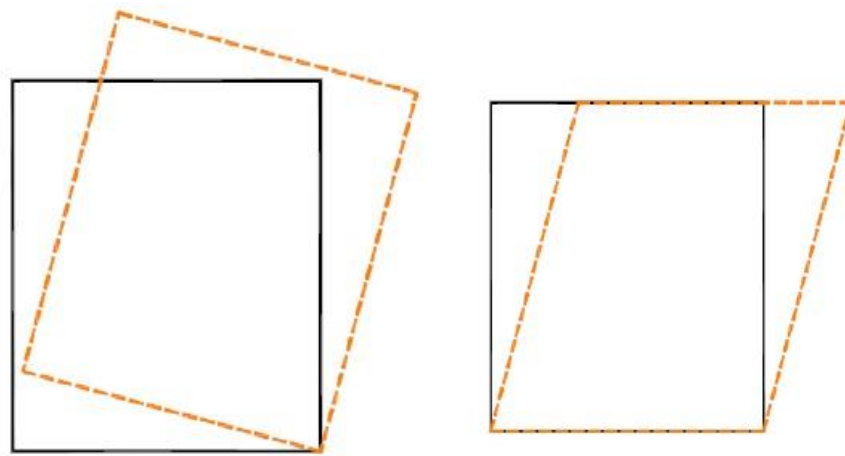


Figura 76 – Esquema de movimento de corpo rígido e de distorção por corte [12]

Pelo que observamos na Figura 77 concluímos que apenas existe encurtamento da diagonal representada pela cor laranja, ou seja apenas existe deformação do lado onde atua a força. Era expectável um comportamento de distorção por corte visto tratar-se de uma parede de tábuas verticais, o que significava ocorrer o mesmo deslocamento na diagonal a azul. Porém, esta não apresentou qualquer deslocamento o que pode ser justificado por um problema no aparelho de leitura ou porque a tábua oposta ao local onde é aplicada a força não se moveu.

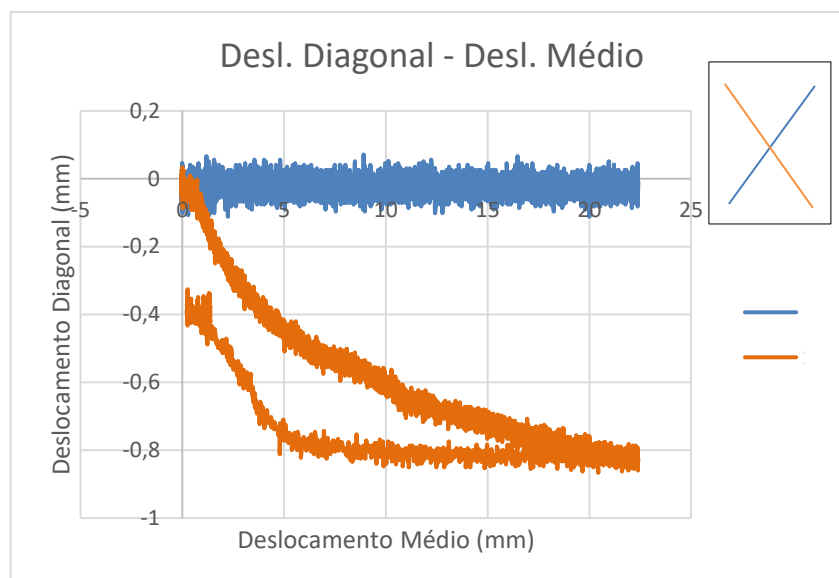


Figura 77 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 1 – Deslocamento Médio

5.3.2. PAREDE 2

Para a obtenção do gráfico do deslocamento médio desta parede foi utilizado o mesmo método que para a parede 1. Esta parede para uma força máxima de corte de 5,1KN tem um deslocamento máximo de cerca de 22mm, Figura 78.

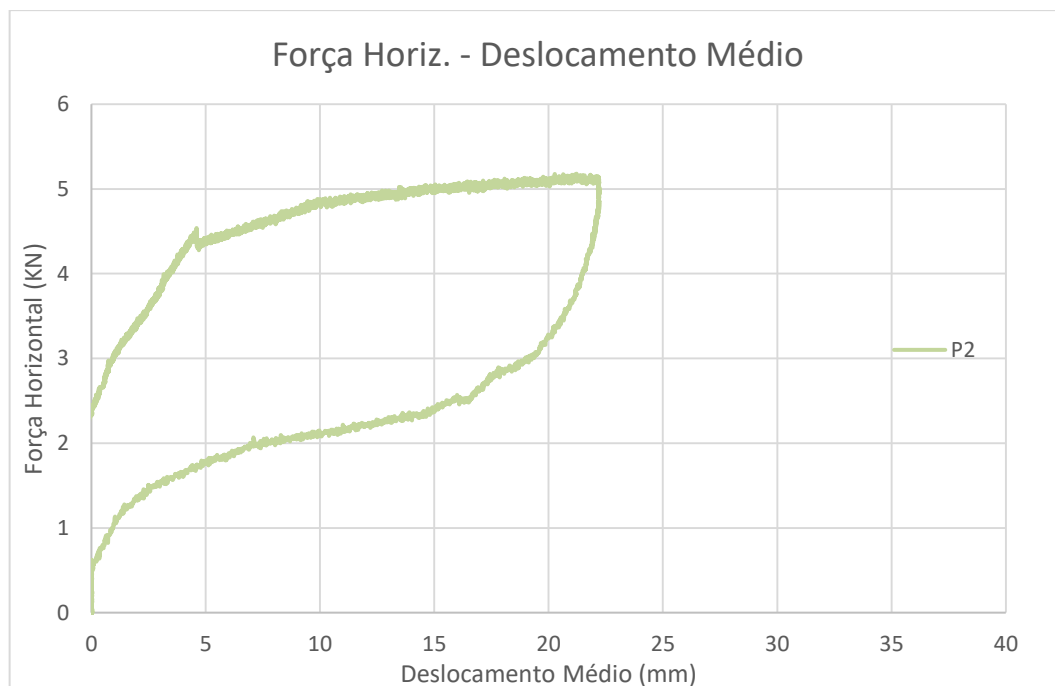


Figura 78 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 2

A rigidez desta parede foi também calculada, para a fase de carga e descarga e em ambos os regimes, Tabela 7.

Tabela 7 - Valores da rigidez ao corte da Parede 2

P2	
K	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,42
	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,07
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,03
	Rigidez descarga (KN/mm)
	1,06

Quanto ao levantamento da parte inferior da parede, do lado onde atua a força de corte, esta parede apresentou um levantamento de cerca de 8,1mm, Figura 79.

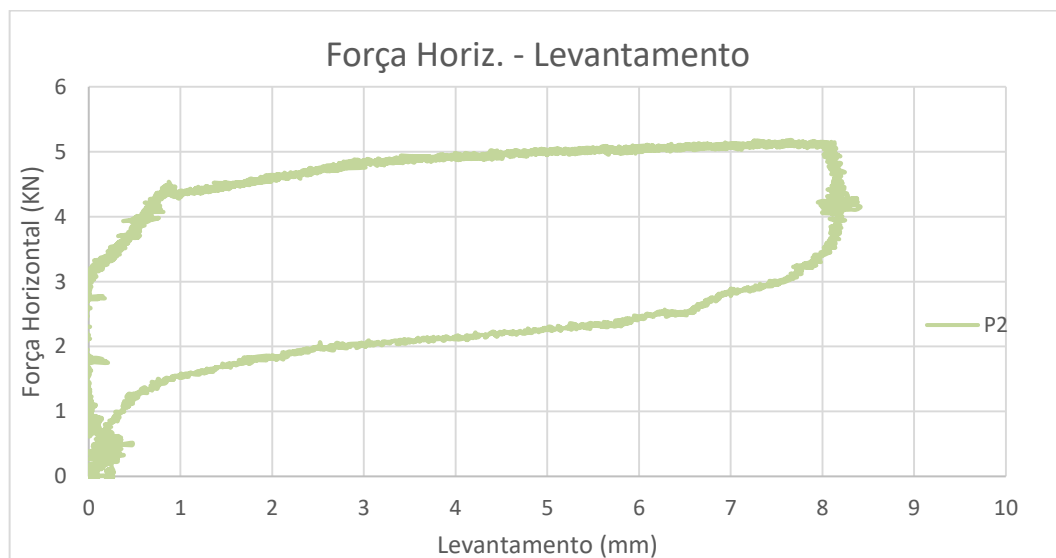


Figura 79 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 2



Figura 80 - Exemplo do levantamento das tábuas verticais no frechal inferior

No que toca à rotação do frechal superior, este apresentou um comportamento com algumas variações na rotação. No entanto estas rotações não têm valor significativo, visto a máxima rotação atingida ter sido em torno do eixo y e ser cerca de 0,5 graus, Figura 81.

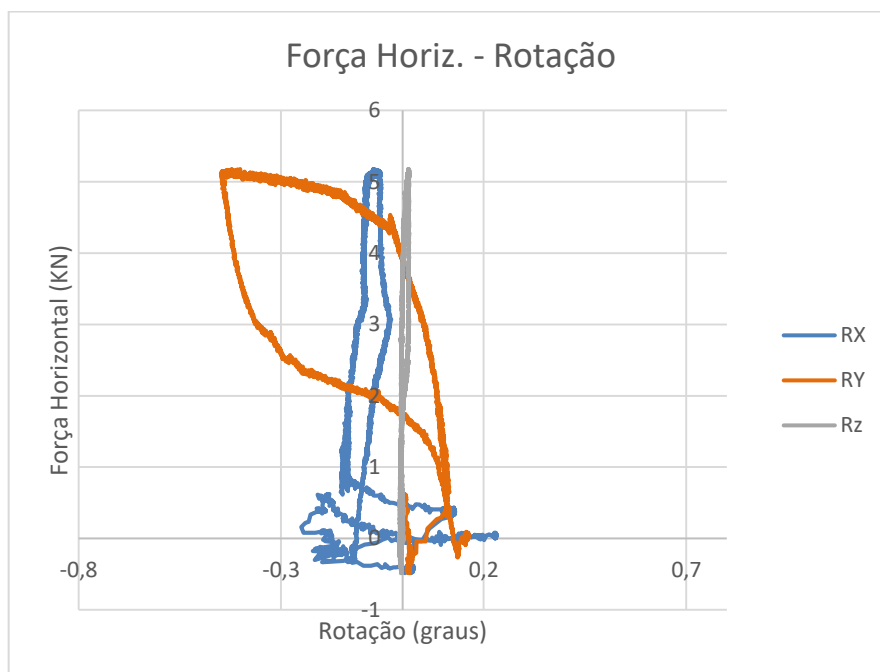


Figura 81 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 2

Observando agora o comportamento da parede através do deslocamento das diagonais em função do deslocamento médio, verificamos que ambas apresentam um valor muito baixo e idêntico de deslocamento, mas em sentidos contrários, Figura 82. Esta parede, quando observado o gráfico, tem um comportamento semelhante ao de distorção. O que pode ser justificado por a tábua diagonal estar disposta na direção da diagonal representada a azul na Figura 82, não sendo assim solicitada a formação de uma escora pela força horizontal, o que se traduz neste comportamento da parede.

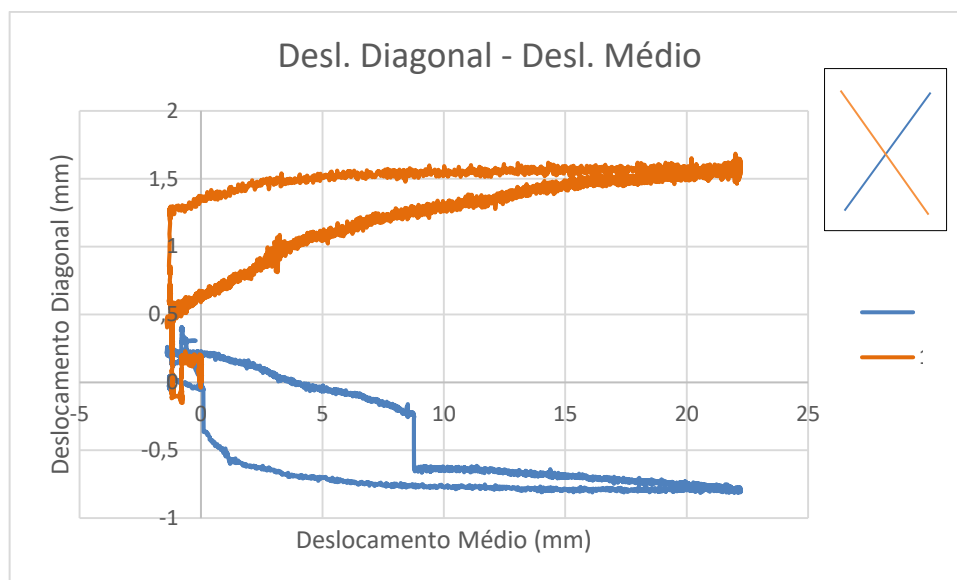


Figura 82 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 2 –Deslocamento Médio

5.3.3. PAREDE 3

Para a obtenção do gráfico do deslocamento médio desta parede foi utilizado o mesmo método das anteriores. Esta parede, para uma força máxima de corte de 7,4KN, tem um deslocamento máximo de cerca de 23mm, Figura 83.

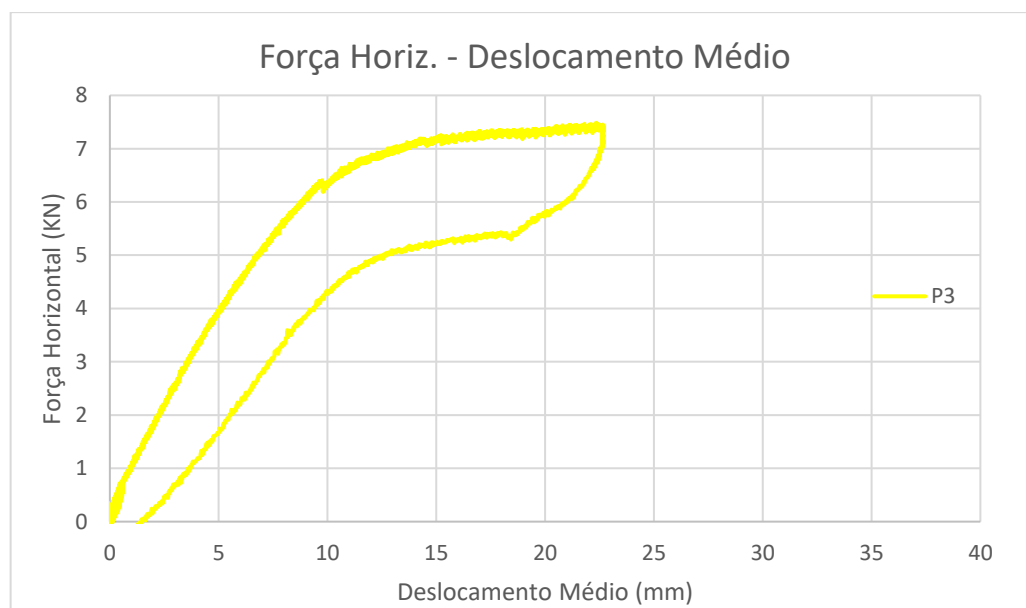


Figura 83 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 3

A rigidez desta parede foi também calculada, para a fase de carga e descarga e em ambos os regimes, Tabela 8.

Tabela 8 - Valores da rigidez ao corte da Parede 3

P3	
K	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,57
	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,52
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,03
	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,31

Quanto ao levantamento da parte inferior da parede, do lado onde atua a força de corte, esta parede apresentou um levantamento de cerca de 4,8mm, Figura 84.

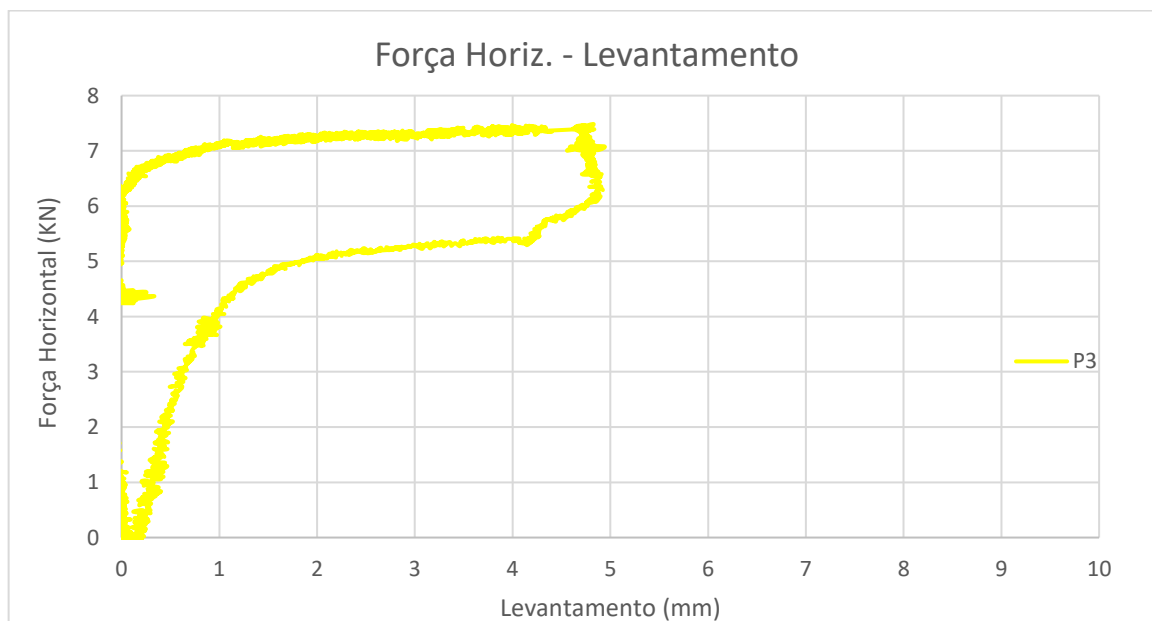


Figura 84 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 3

No que toca à rotação do frechal superior, este apresenta também algumas variações na rotação em torno dos eixos x e y, rotações que são mínimas, rondando os 0,2 graus, Figura 85 .

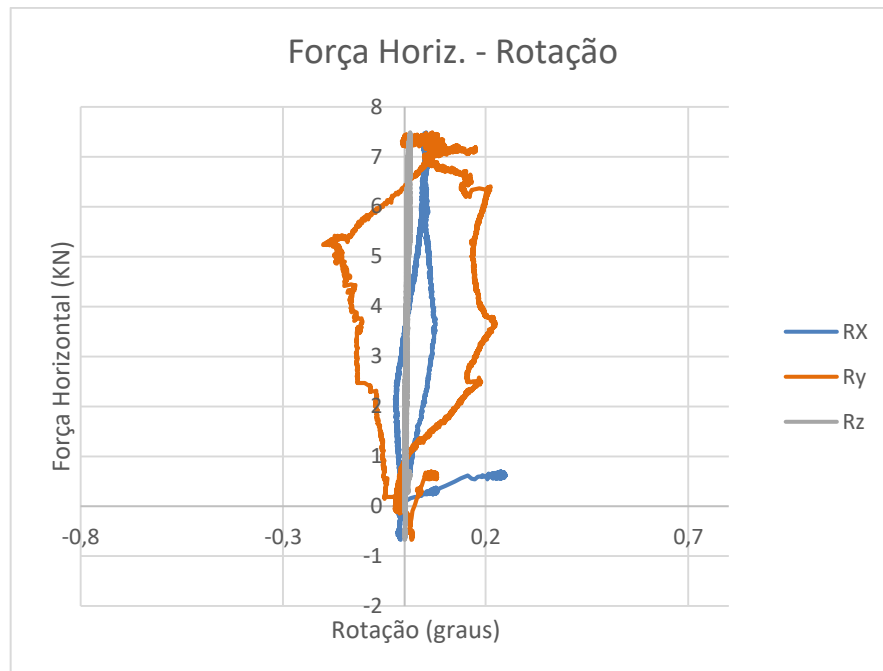


Figura 85 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3

Observando por fim o comportamento da parede com a análise do deslocamento dos dispositivos dispostos na diagonal presentes no gráfico da Figura 86, verificamos que a diagonal representada pela cor azul é tracionada, por haver aumento de deslocamento. A diagonal representada pela cor a laranja não apresenta qualquer deslocamento, visto ter sido fixada à tábua diagonal presente nesta parede; esta tábua está a funcionar como escora que conduz a força horizontal aplicada, e por isso não apresenta qualquer deslocamento. Esperava-se que esta parede apresentasse um comportamento de corpo rígido, contudo, como a recolha de dados foi inconclusiva devido à má disposição dos medidores de deslocamento na tábua diagonal, este comportamento não pode ser confirmado.

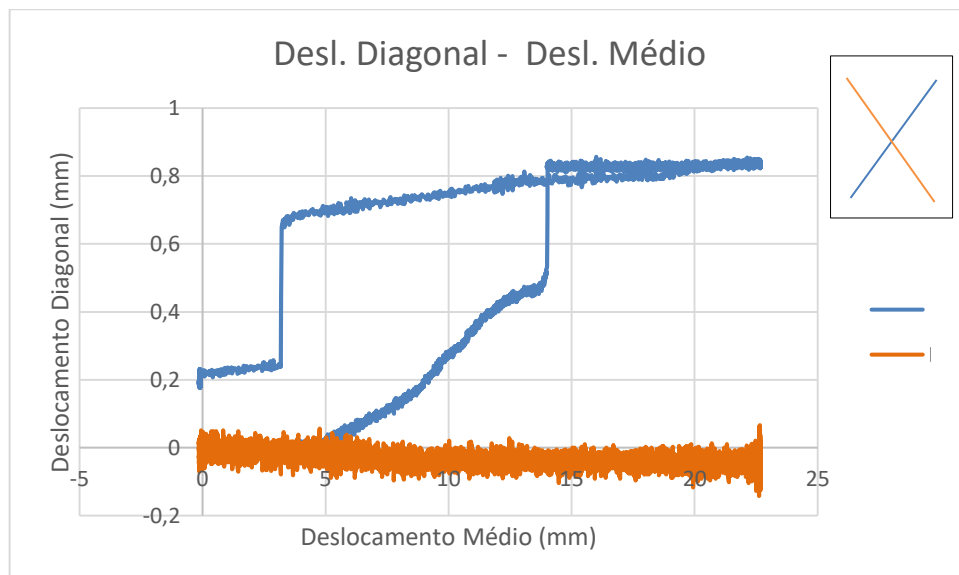


Figura 86 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 3 –Deslocamento Médio

5.3.4. PAREDE 4

O gráfico do deslocamento médio desta parede, utilizando o mesmo método das anteriores, Figura 87, apresenta um deslocamento máximo de cerca de 38mm para uma força máxima de corte de 6,2KN.

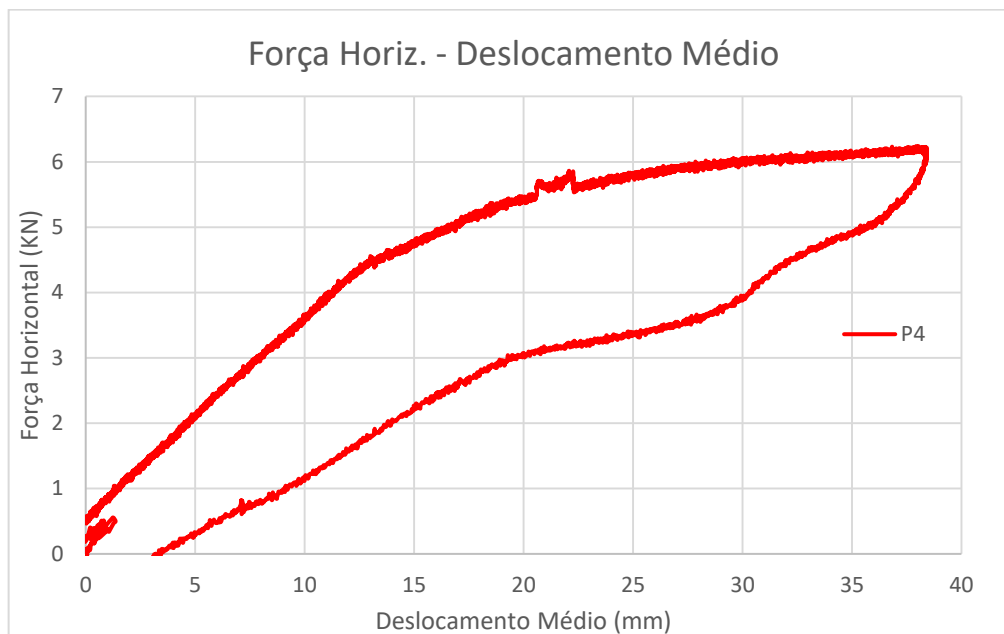


Figura 87 - Gráfico Força – Deslocamento médio da Parede 4

A rigidez desta parede foi também calculada, para a fase de carga e descarga e em ambos os regimes, Tabela 9.

Tabela 9 - Valores da rigidez ao corte da Parede 4

P4	
K	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,3
Plástico	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,19
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)
	0,04
Plástico	Rigidez descarga (KN/mm)
	0,19

Quanto ao levantamento da parte inferior da parede, do lado onde atua a força de corte, esta parede apresentou um levantamento de cerca de 8,7mm, Figura 88.

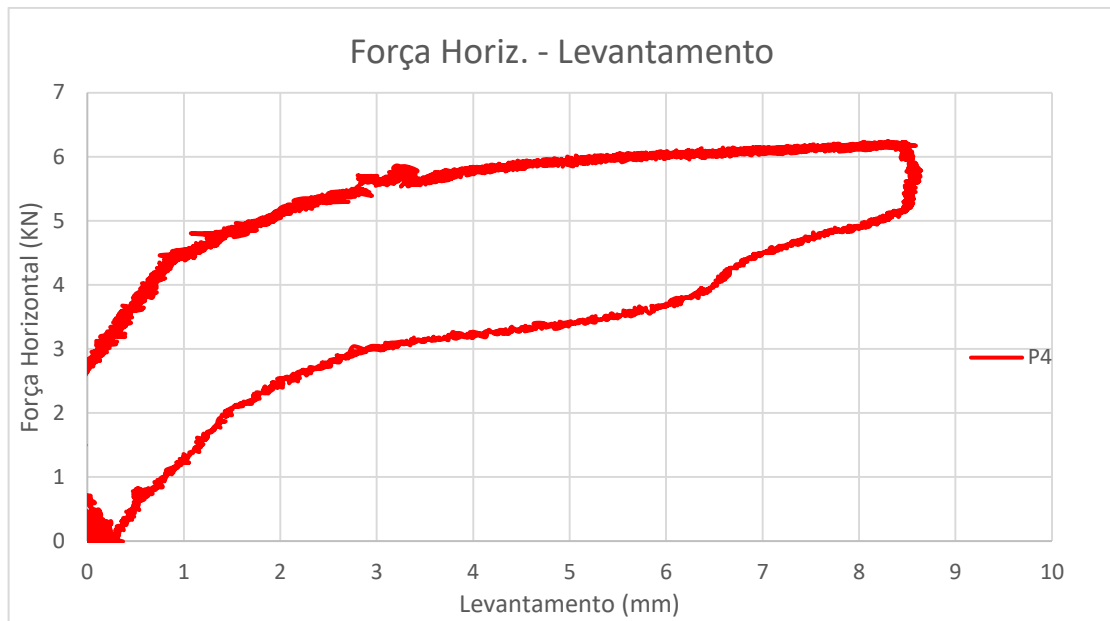


Figura 88 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 4

No que toca à rotação do frechal superior, este apresenta uma ligeira rotação em torno do eixo y de cerca de 0,8 graus, enquanto em torno dos outros eixos as rotações não tem relevância, Figura 89.

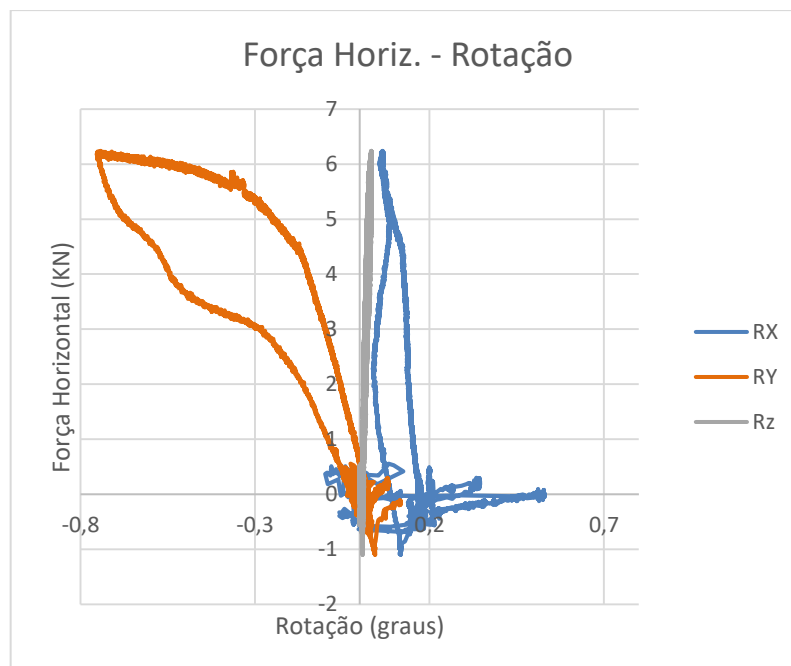


Figura 89 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 4

Observando por fim o comportamento da parede com a análise do deslocamento dos dispositivos dispostos na diagonal, vemos que apresentam deslocamentos muito próximos e em sentidos contrários, Figura 90, o que ilustra o comportamento de distorção, o esperado neste tipo de paredes constituídas apenas por tábuas verticais, onde cada tábua se move na mesma direção e não como um corpo rígido.

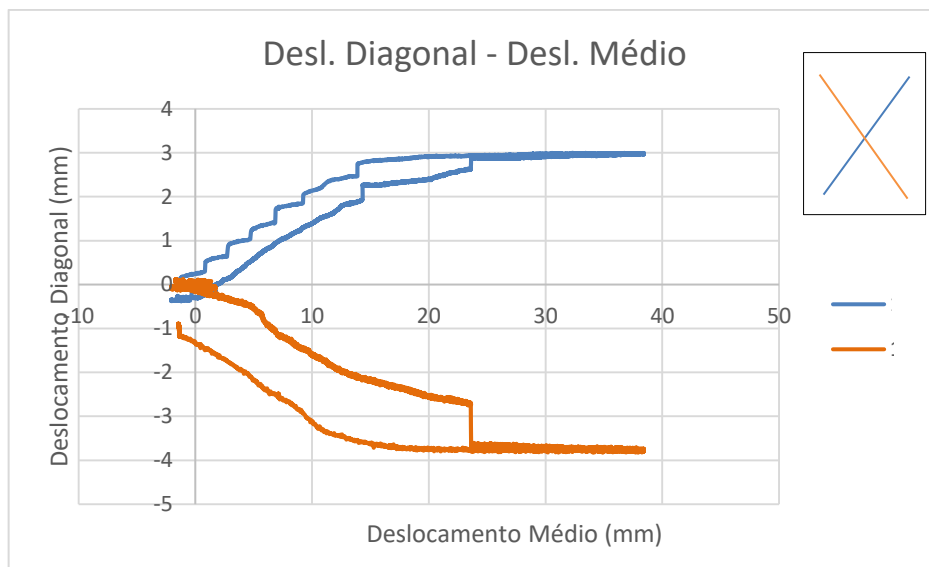


Figura 90 - Gráfico Deslocamento Diagonais da Parede 4 –Deslocamento Médio

5.3.5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS 4 PAREDES

Comparando agora as 4 paredes e o seu comportamento Figura 91, verificamos que a parede que resiste a uma força maior é a parede 3, devido à presença da tábua diagonal na direção da força o que lhe confere mais resistência, porém sendo mais rígida apresenta deslocamentos médios menores para a força a que está submetida. Já a parede 4 é a que apresenta maiores deslocamentos médios para valores de força muito próximos das paredes 1 e 2, pode dizer-se então que esta parede tem um comportamento mais dúctil.

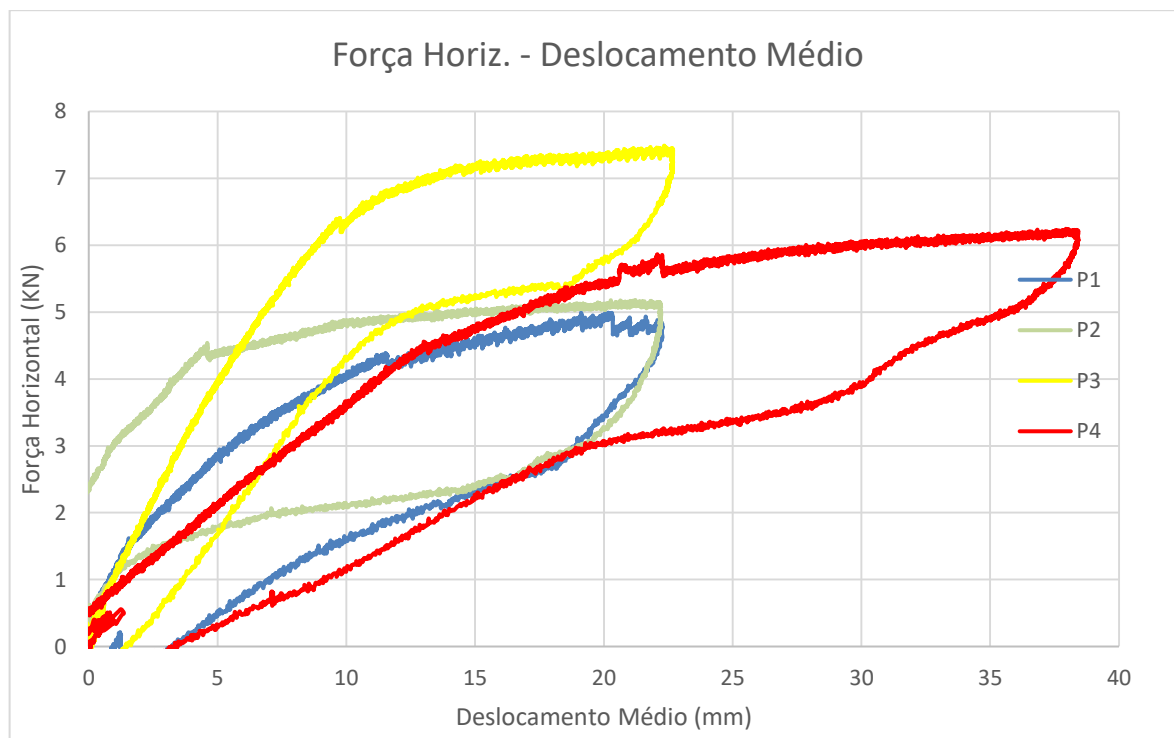


Figura 91 – Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, de todas as paredes

É ainda apresentado na Tabela 31 a compilação de todos os valores de rigidez horizontal das paredes em estudo.

Tabela 10 - Valores da rigidez horizontal de todas as paredes

		P1	P2	P3	P4
		K	K	K	K
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,24	0,42	0,57	0,3
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,23	0,07	0,52	0,19
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,08	0,03	0,023	0,038
	Rigidez descarga (KN/mm)	1	1,06	0,31	0,19

5.4. FASE 3 – COMPRESSÃO E CORTE DA PAREDE 3 COM REFORÇO

Como já referido no capítulo 4, a terceira fase de ensaios experimentais consistiu em ensaiar a parede 3 impondo uma força de vertical de compressão constante de 10KN/m e uma força horizontal crescente com vários ciclos de deslocamentos unidirecionais. Repetiu-se assim os testes da segunda fase, mas agora introduzindo um reforço na parte inferior da parede através de uma cantoneira metálica a ligar a base da parede ao frechal inferior, com o objetivo de impedir o levantamento, verificado na fase 2, na ligação das tábuas ao frechal. Numa segunda parte do ensaio, foi ainda retirado o reboco a esta parede de forma a perceber-se a sua influência no comportamento da parede.

A disposição dos medidores de deslocamento na parede, para esta fase de ensaio, foi a mesma da fase 2.



Figura 92 - Reforço na parte inferior da parede

5.4.1. COM REBOCO

Como podemos ver pelo gráfico da Figura 93, a parede foi sujeita a 3 ciclos de carga, verificando-se uma alteração na rigidez, através da variação das inclinações das retas, de ciclo para ciclo, tendo a parede atingido um deslocamento máximo de cerca de 37mm para uma força máxima de corte de cerca de 10,3KN.

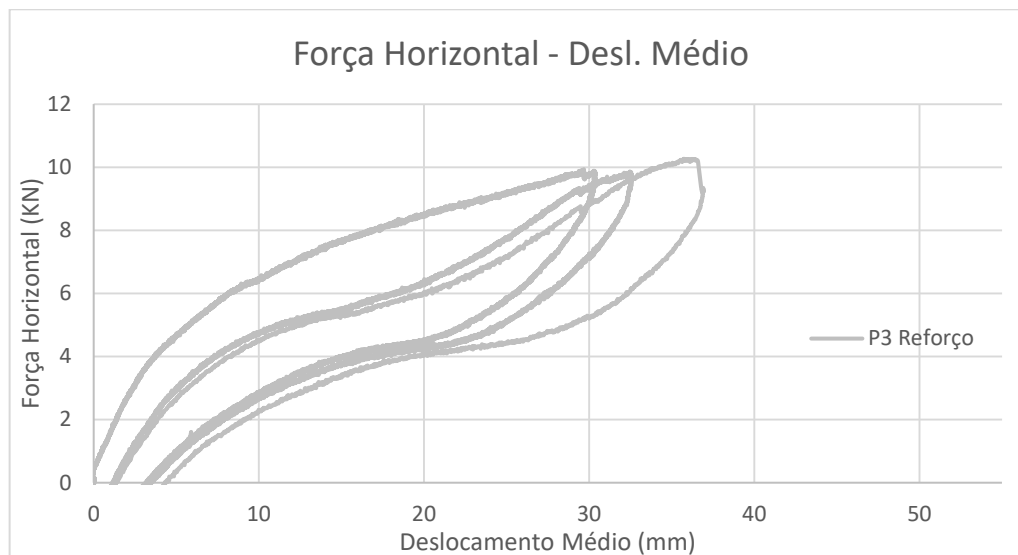


Figura 93 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada

Os valores da variação da rigidez, calculados da mesma forma que nos ensaios anteriores e para os mesmos regimes de comportamento (elástico e plástico), da parede nesta fase de ensaio são os apresentados na Tabela 11 para os 3 ciclos de deslocamento impostos.

Tabela 11 – Variação da rigidez da Parede 3 reforçada, para os vários ciclos de carga

		1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo
		K	K	K
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	1,2	0,66	0,72
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,38	0,38	0,35
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,15	0,34	0,33
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,6	0,54	0,97

Quanto ao levantamento da parte inferior da parede em relação ao frechal inferior, com a fixação da cantoneira é esperado que não ocorra qualquer tipo de levantamento visto ser uma medida de reforço muito rígida, como se comprova pela Figura 94; a parede apresenta um deslocamento nulo até à força de 6KN. A partir deste valor de força verificamos um aumento de deslocamento que é justificado pelo levantamento da tábua diagonal em relação às tábuas verticais, visto o medidor de deslocamento estar fixo superiormente na tábua diagonal e inferiormente na tábua vertical, medindo assim a abertura entre estas - Figura 95. Foi observado ainda que ocorreu o levantamento do frechal superior em relação às tábuas verticais durante o ensaio Figura 96. O valor de levantamento obtido corresponde então à soma destes dois levantamentos.

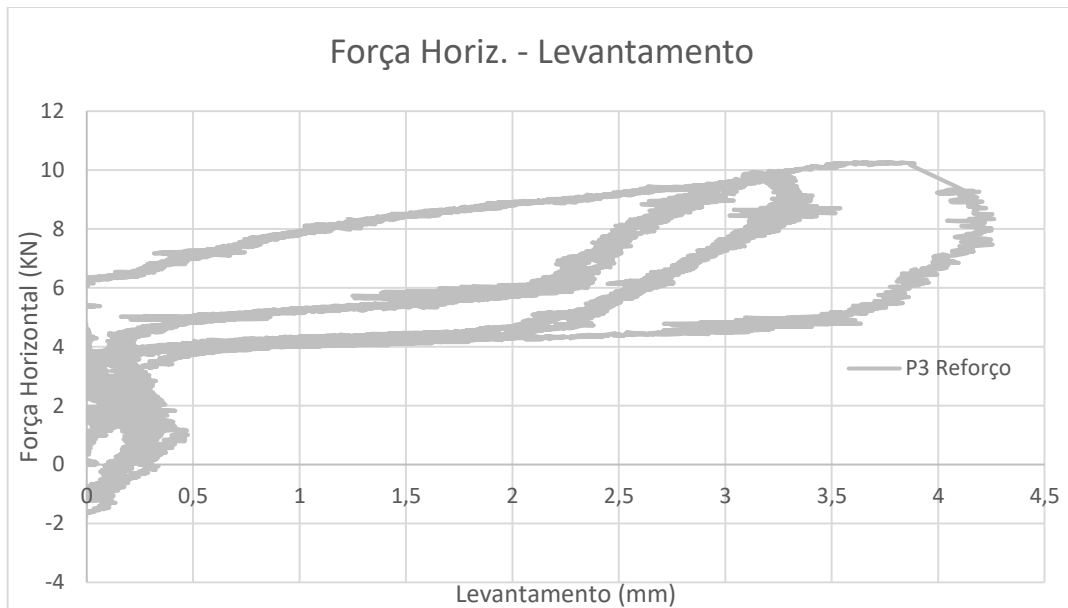


Figura 94 - Gráfico Força Horizontal – Levantamento da Parede 3 reforçada



Figura 95 – Pormenor da ligação dos medidores de deslocamento em diferentes tábuas



Figura 96 - Levantamento do frechal superior

No que toca à rotação do frechal superior, podemos constatar através do gráfico da Figura 97, que apresenta uma rotação sobre o eixo y de cerca de 1,3 graus e uma rotação sobre o eixo x de cerca de 0,7 graus.

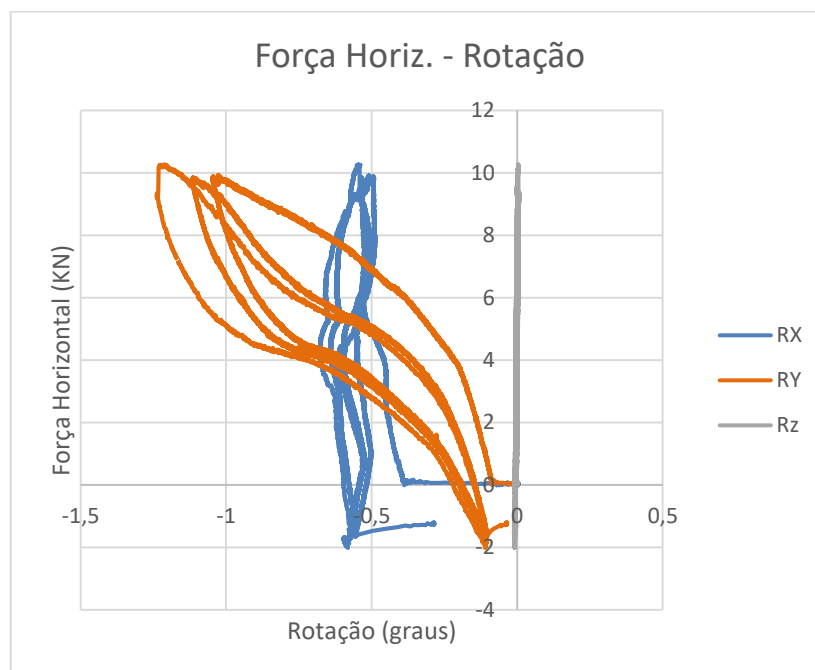


Figura 97 - Gráfico Força Horizontal - Rotação do Frechal Superior da Parede 3 reforçada

Avaliando agora o comportamento da parede através dos deslocamentos medidos na diagonal, verificamos que a parede apresenta um comportamento semelhante ao de distorção, sendo que ambas as diagonais apresentam o mesmo deslocamento, mas em sentidos contrários, Figura 98. Este resultado é justificado pelo facto do movimento como corpo rígido ser impedido pela cantoneira fixa à base.

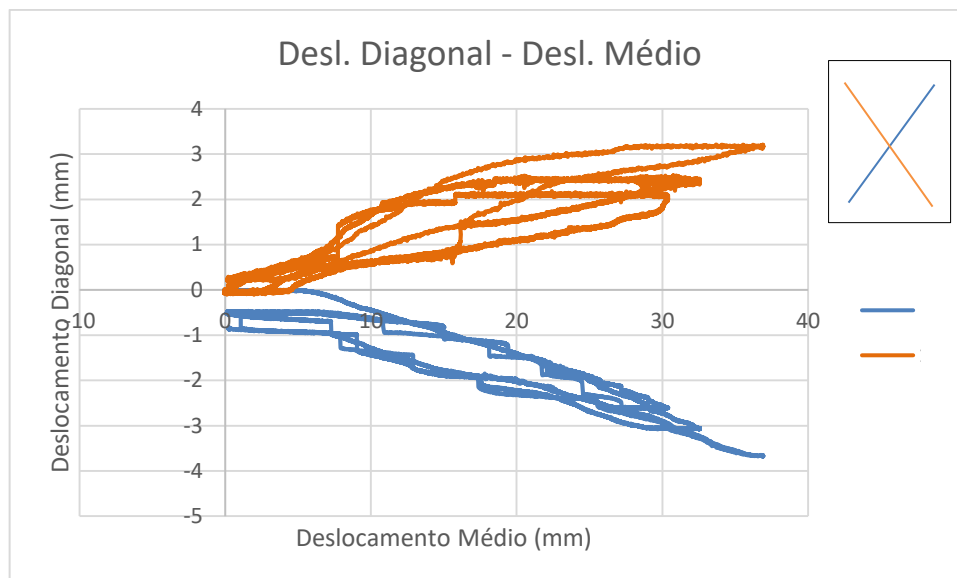


Figura 98 – Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada

5.4.2. SEM REBOCO

O comportamento da parede sem revestimento apresenta também uma variação da rigidez para cada ciclo, o que se justifica por eventual enfraquecimento das ligações, e apresenta um deslocamento máximo de aproximadamente 49mm para uma força máxima de corte de 9KN, Figura 99.

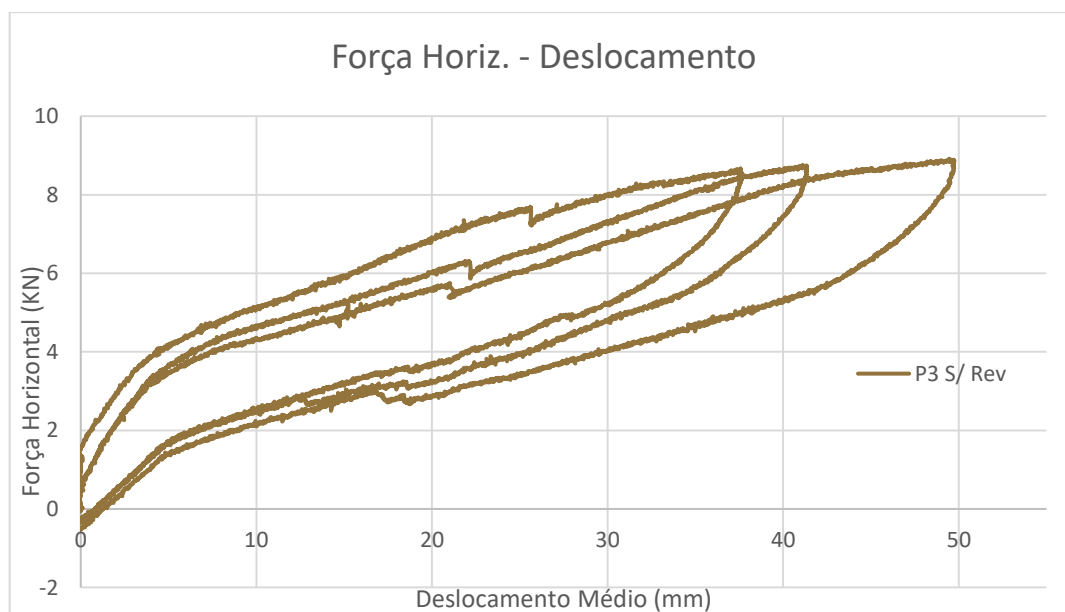


Figura 99 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento

São então apresentados na Tabela 12 os valores da variação de rigidez deste ensaio para cada ciclo de carga.

Tabela 12 - Variação da rigidez da Parede 3 reforçada e s/ revestimento, para os vários ciclos de carga

		1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo
		K	K	K
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,49	0,6	0,55
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,2	0,36	0,3
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,13	0,16	0,14
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,38	0,56	0,39

Não é apresentado o estudo do valor do levantamento da base da parede para esta fase do ensaio, visto os dados recolhidos no ensaio não apresentarem dados coerentes com o seu comportamento.

Quanto à rotação do frechal superior, apresenta uma rotação de cerca de 3,4 graus segundo o eixo x e uma rotação de cerca de 1,8 graus segundo o eixo y, Figura 100. Estes valores de rotação são muito elevados quando comparados com os outros ensaios, pelo que a ausência do reboco e a presença da cantoneira podem alterar as condições da rotação do frechal superior.

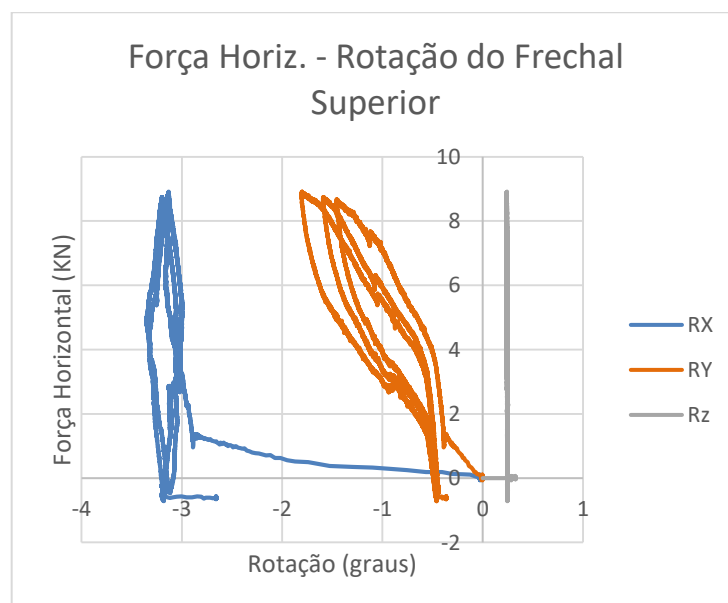


Figura 100 - Gráfico Força - Rotação do Frechal Superior da Parede 3 reforçada e s/ revestimento

Quanto ao comportamento da parede através do estudo do deslocamento das diagonais, Figura 101, verificamos que a diagonal representada pela cor azul apresenta um deslocamento de 14mm enquanto a de cor laranja não apresenta qualquer tipo de deslocamento/ deformação, visto este último estar disposto integralmente na diagonal da parede. Não podemos concluir nada acerca do tipo de movimento desta parede.

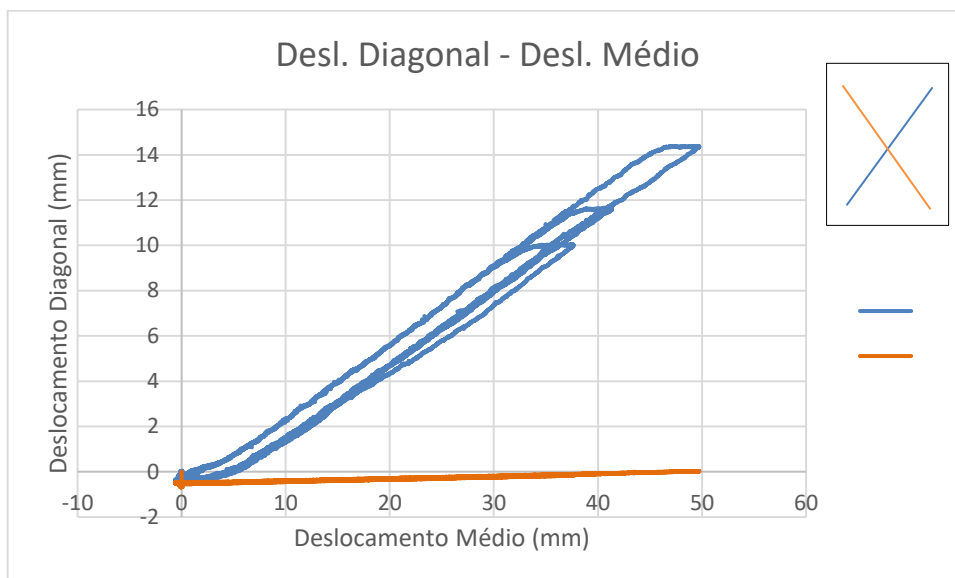


Figura 101 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento

5.4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS ENSAIOS DA PAREDE 3

Comparando assim todas as fases de ensaio ao corte desta parede verificamos, por comparação com os resultados da fase 2 de ensaio, Figura 102, que a aplicação da cantoneira não altera a rigidez inicial do carregamento. Porém, confere à parede uma maior capacidade resistente, passando a força máxima de corte de 7KN para 10KN e o deslocamento médio de cerca de 23mm para 38mm.

Analisando agora o efeito do reboco na parede, verificamos que na fase inicial do carregamento este não altera em nada o comportamento da parede. Porém, quando esta atinge a força de 4KN existe uma mudança no comportamento da parede, baixando a sua rigidez e resistência. A ausência de reboco baixa a carga máxima de corte para cerca de 8KN, mas, em contrapartida, aumenta o deslocamento máximo para cerca de 50mm.

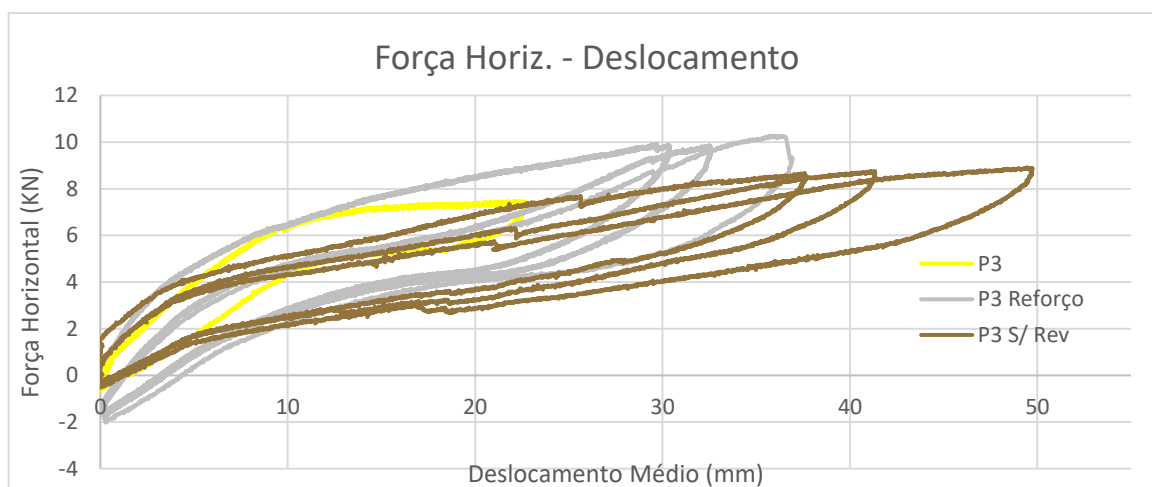


Figura 102 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, de todos os ensaios da Parede 3

São apresentados na Tabela 13 os vários valores de rigidez de todos os ensaios de corte da Parede 3.

Tabela 13 - Compilação das rigidezes da Parede 3, para os vários ensaios

	P3	P3 C/ Reforço			P3 C/ Reforço e S/ Revest.		
		1º Ciclo	2º Ciclo	3º Ciclo	1º Ciclo	2º Ciclo	3º Ciclo
Rigidez carga (KN/mm)	0,57	1,20	0,66	0,72	0,49	0,60	0,55
Elástico							
Rigidez descarga (KN/mm)	0,52	0,38	0,38	0,35	0,20	0,36	0,30
Rigidez carga (KN/mm)	0,03	0,15	0,34	0,33	0,13	0,16	0,14
Plástico							
Rigidez descarga (KN/mm)	0,31	0,60	0,54	0,97	0,38	0,56	0,39

5.5. FASE 4 – COMPRESSÃO SIMPLES E CORTE COM CICLOS DE CARGA NOS DOIS SENTIDOS

Como já explicado anteriormente, esta quarta e última fase de ensaios consiste em ensaiar as paredes em estudo para uma força de corte no plano com ciclos de carga nos dois sentidos e compressão constante. No primeiro ensaio a parede encontra-se rebocada, procedendo-se em seguida à remoção do reboco e repetição do ensaio de forma a perceber o efeito do reboco no comportamento das paredes ao corte.

Iria ser feito também um ensaio de compressão simples a todas as paredes sem o reboco, com o objetivo de avaliar também o seu contributo para o comportamento da parede à encurvadura. Contudo, por falta de tempo, apenas foram ensaiadas as paredes 2 e 3, com tábua diagonal, sendo que a parede 3 foi ensaiada à compressão e ao corte no plano com ciclos de deslocamento nos dois sentidos e sem estar rebocada, dado o seu reboco já ter sido removido na fase 3 de ensaios. A parede 2 foi ensaiada apenas ao corte com ciclos de deslocamentos nos dois sentidos, com e sem revestimento.

5.5.1. PAREDE 3

A parede 3 foi ensaiada nas condições em que findou o último ensaio da terceira fase, ou seja sem revestimento e com a cantoneira na base da parede. Assim, esta foi inicialmente ensaiada à compressão simples e de seguida ensaiada ao corte com ciclos de deslocamentos bidirecionais.

5.5.1.1. Compressão

A disposição de medidores de deslocamentos utilizada para este ensaio foi a ilustrada na Figura 103.

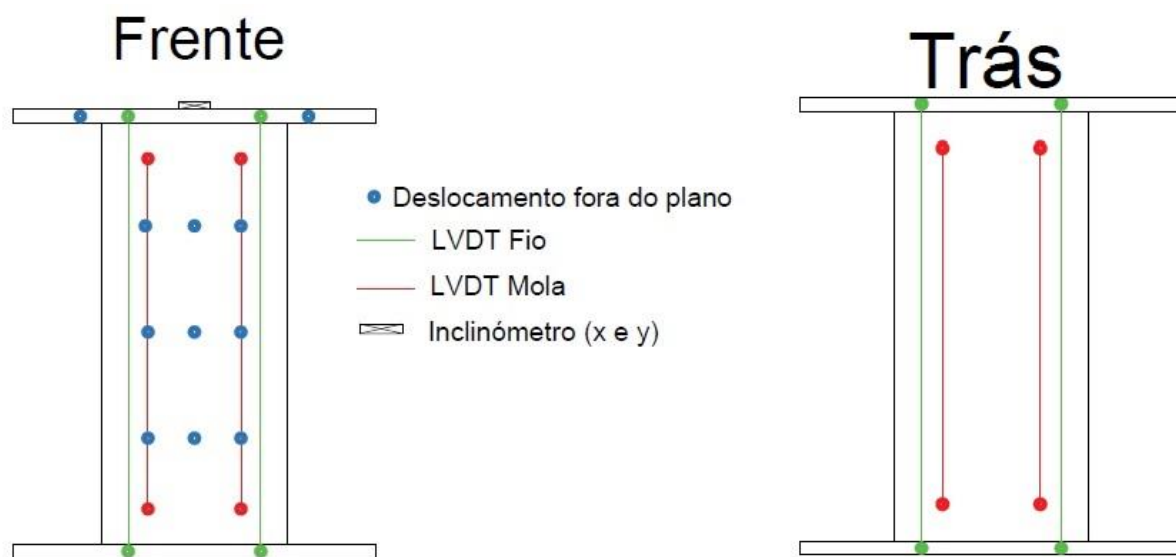


Figura 103 - Disposição de LVDTs da Parede 3, Fase 4 compressão

O ensaio de compressão desta parede não decorreu até à carga crítica da parede devido a problemas com o *setup* do ensaio. Este teve de ser interrompido, pois havia o risco do sistema que aplica as forças no frechal superior cair, devido a condições iniciais impróprias, ligeira inclinação inicial e alguma folga nas ligações da madeira do frechal, que provocaram um excesso de rotação do mesmo, Figura 104. Este comportamento pode ter ocorrido também por as condições da parede não serem as mesmas do ensaio de compressão da fase 1, visto o sistema que impede o deslocamento do frechal superior ter sido alterado, assim como a aplicação da cantoneira na base introduzir um encastramento na mesma o que altera as condições de encurvadura da parede.

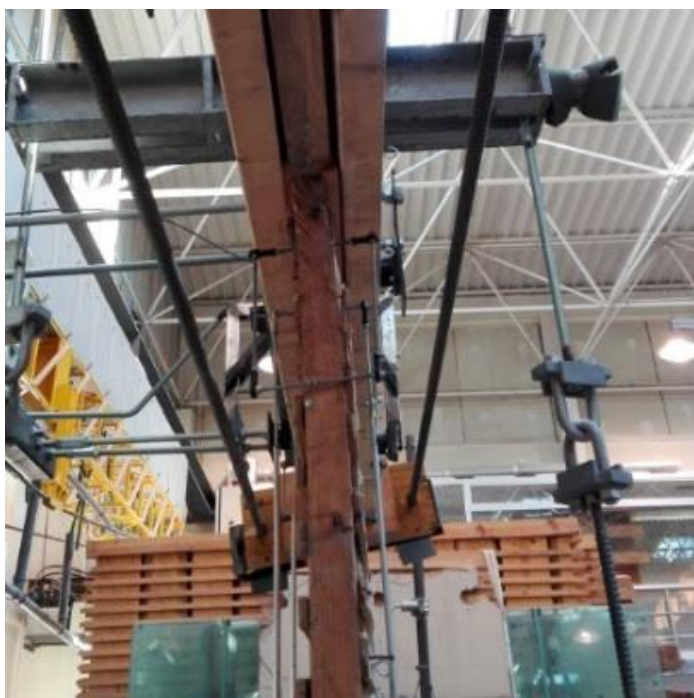


Figura 104 - Rotação excessiva do frechal em relação à parede 3 na fase 4

Assim, nas condições descritas, o ensaio de compressão desta fase atingiu uma força de cerca de 30KN/m para um deslocamento de cerca de 1mm. Quando comparados os comportamentos da mesma parede para estes dois ensaios, estes demonstram um comportamento distinto, Figura 105, sendo que sem o reboco a rigidez da parede deveria ser inferior à da parede rebocada.

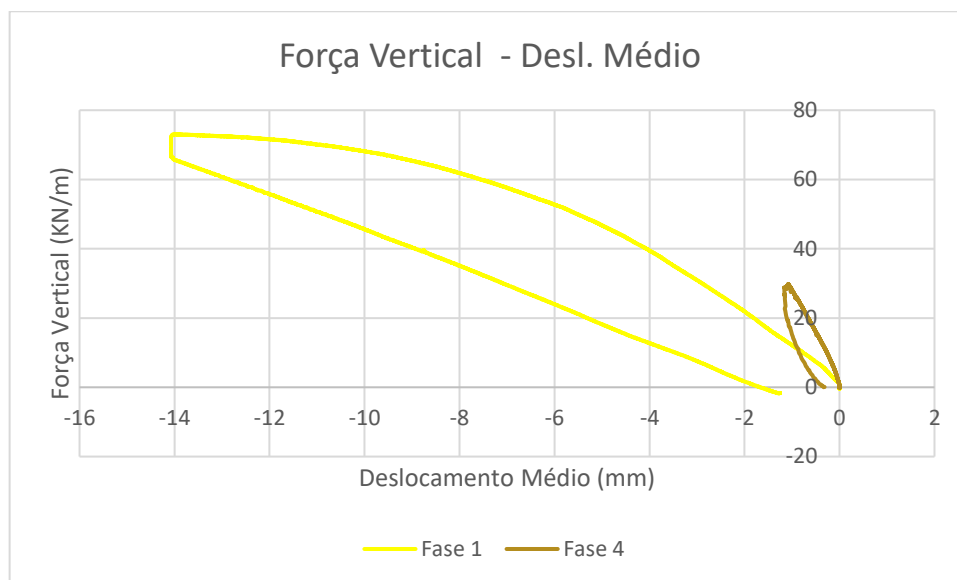


Figura 105 – Gráfico Força – Deslocamento Médio da Parede 3 na fase 4

A Tabela 14 mostra os valores estimados de rigidez e módulo de elasticidade da parede 3, com e sem revestimento, valores que por serem tão díspares e não corresponderem ao teoricamente idealizado, não permitem concluir nada acerca deste ensaio.

Tabela 14 – Rigidez e módulo de elasticidade da Parede 3 com e sem revestimento

	P3	P3 S/ Revest.
Rigidez carga (KN/mm)	9,6	26,4
Rigidez descarga (KN/mm)	5,6	44,6
E - carga (KN/mm ²)	0,6	1,8
E - des-carga (KN/mm ²)	0,4	3

5.5.1.2. Corte com compressão constante

Este ensaio de corte com compressão constante, como já descrito, foi feito através de ciclos de carga bidirecionais onde se impuseram deslocamentos no atuador de 5, 10, 20, 30 e 40 mm, tentou-se também manter uma força de compressão constante de 10KN/m. O objetivo deste ensaio foi perceber o efeito da tábua diagonal em função do sentido de atuação da força, para a parede sem revestimento e com a cantoneira no frechal inferior.

A disposição dos medidores de deslocamento, para esta fase de ensaios, foi a mesma da fase 2.

Fazendo então a comparação entre o ensaio unidirecional da fase 3 e o bidirecional, Figura 106, verificamos que no ensaio bidirecional a parede apresenta um comportamento muito diferente do que o esperado, quando comparado com o ensaio unidirecional. Os valores correspondentes com a aplicação de carga no sentido negativo assemelham-se bastante aos valores do ensaio unidirecional, pelo que dever-se-ia ensaiar de novo esta parede para tentar perceber melhor o seu comportamento e estes resultados.

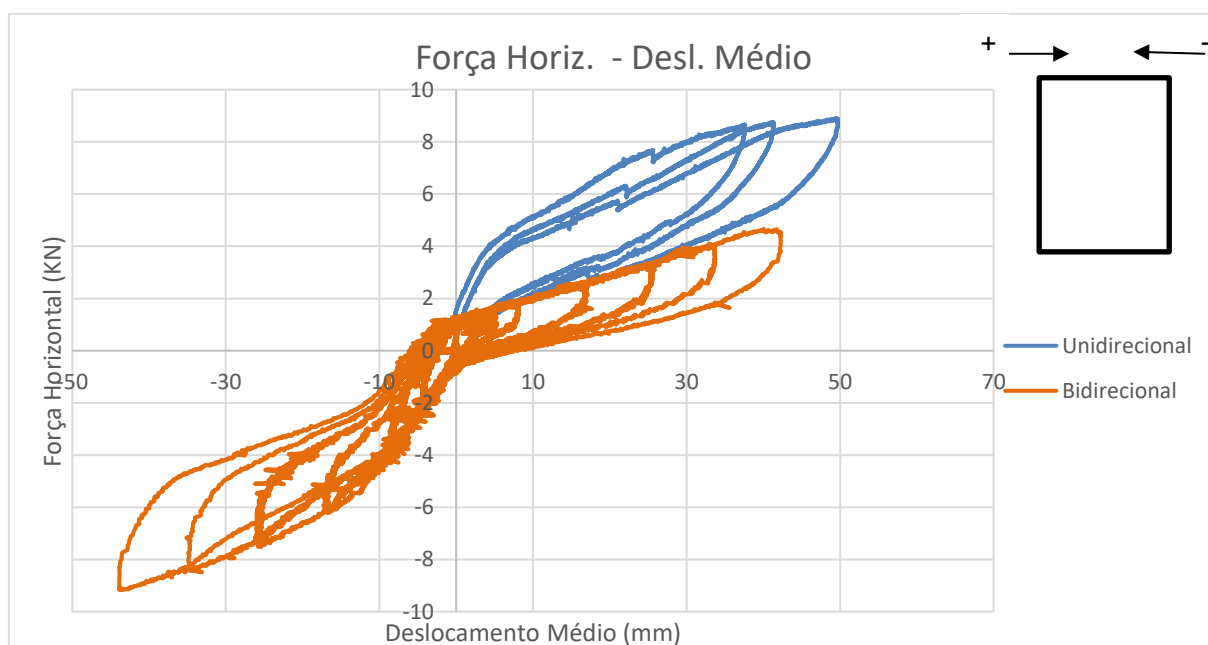


Figura 106 - Gráfico Força Horizontal – Deslocamento Médio, da Parede 3 reforçada e s/ revestimento para os ciclos unidirecionais e bidirecionais

Na Tabela 15 temos os respectivos valores de rigidez calculados, fazendo uso do mesmo procedimento das outras fases, para o último ciclo de cada carregamento. Podemos ver a semelhança nos valores entre a fase 3 e o sentido negativo do carregamento, como acima descrito.

Tabela 15 - Valores de rigidez da Parede 3 para o último ciclo de cada carregamento

		Fase 3	Sentido Posi- tivo	Sentido Nega- tivo
		K	K	K
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,55	0,37	0,32
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,3	0,08	0,33
	Rigidez carga (KN/mm)	0,14	0,09	0,14
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,39	0,64	0,7

Quanto ao levantamento da parte inferior da parede em relação ao frechal, verificámos que a cantoneira não permite o levantamento, dado que não existem deslocamentos positivos, Figura 107; os deslocamentos positivos existentes correspondem ao fenómeno já relatado de levantamento da tábua diagonal em relação à vertical, dado o posicionamento dos medidores de deslocamento e do levantamento do frechal superior, Figura 108.

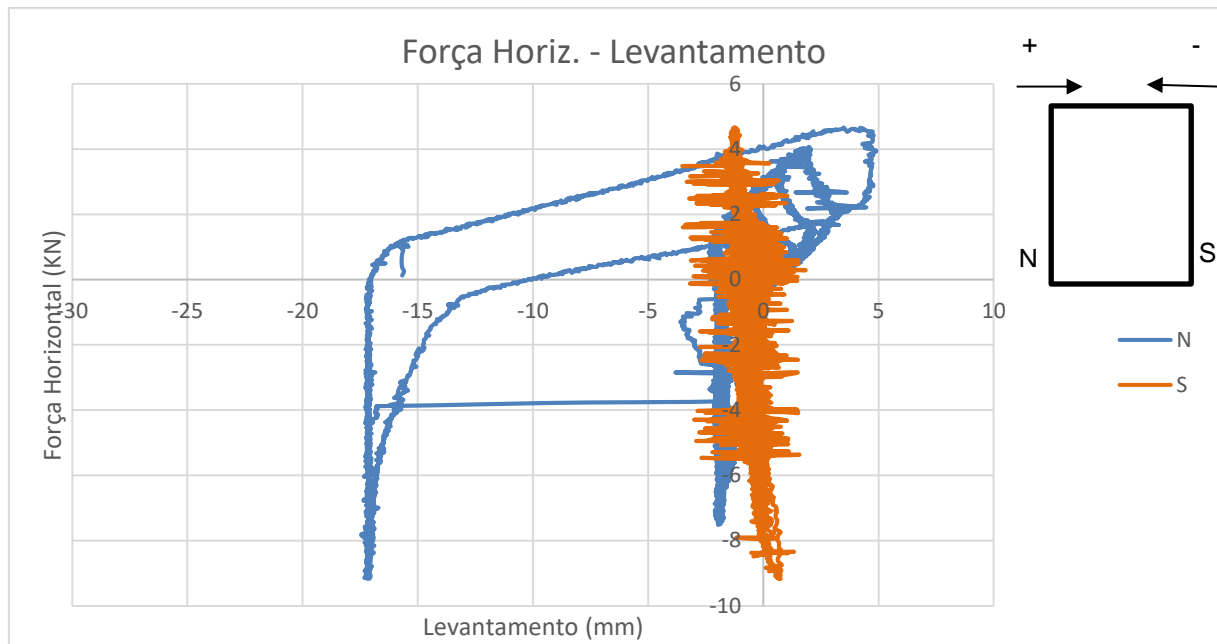


Figura 107 – Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da parede em ambas as extremidades

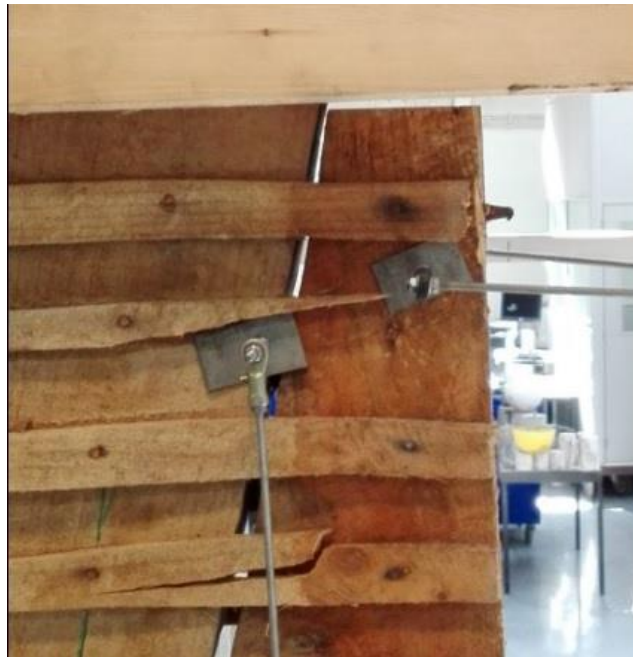


Figura 108 - Exemplo do levantamento do frechal superior na fase de ensaio 4

Analisando agora o comportamento da parede através do deslocamento das diagonais, verificamos que apenas a diagonal representada a azul apresenta deslocamento enquanto a diagonal a laranja, por estar disposta na tábua diagonal, não apresenta valor de deslocamento significativo para qualquer dos sentidos de carregamento Figura 109. Esta parede apresentará um movimento de distorção por estar fixa na base pela cantoneira.

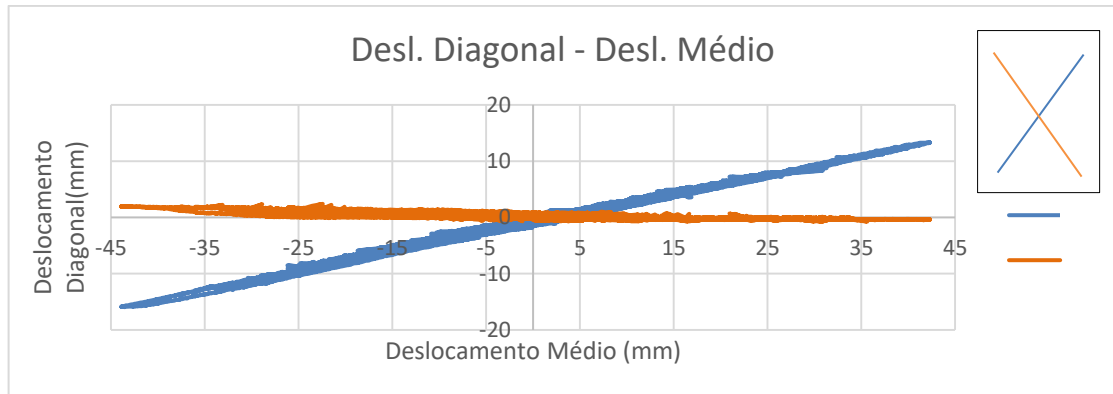


Figura 109 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 3 reforçada e s/ revestimento carregamento bidirecional

5.5.2. PAREDE 2

A parede 2 foi ensaiada para um força de horizontal de corte, através de ciclos de carga bidirecionais onde se impuseram deslocamentos máximos no atuador de 5, 10, 20, 30 e 40 mm; procurou-se também manter uma força de compressão constante de 10KN/m. Foi estudado o seu comportamento para este ensaio com e sem revestimento.

A disposição dos medidores de deslocamento, para esta fase de ensaios, foi a mesma da fase 2.

5.5.2.1. Com Revestimento

Analisando a Figura 110 verificamos que no sentido positivo de incremento de força, a parede apresenta um valor máximo de força de corte de cerca de 6KN e um deslocamento de 24mm. Já quando se aplica a força no sentido negativo, esta apresenta um valor máximo de cerca de -5,5KN e um deslocamento de 25mm. Podemos concluir então que esta parede com o revestimento apresenta um comportamento idêntico nas duas direções.

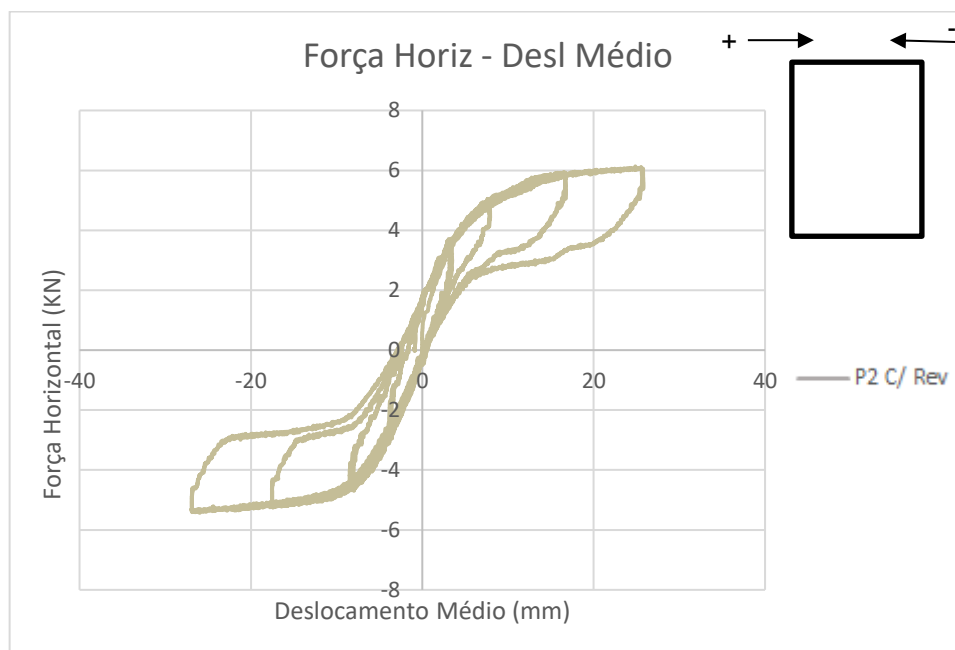


Figura 110 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 com revestimento

São apresentados na Tabela 16 os valores de rigidez obtidos através do gráfico acima para a parede 2 ensaiada com reboco e para o último ciclo de carga bidirecional.

Tabela 16 - Valores da Rigidez da Parede 2 C/ Revestimento para ensaio bidirecional

P2 C/ Revest.		
	Positivo	Negativo
	K	K
Elástico		
	Rigidez carga (KN/mm)	0,57 0,64
Plástico		
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,41 0,35
	Rigidez carga (KN/mm)	0,15 0,035
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,42 0,88

Quanto ao comportamento do frechal superior, Figura 111, este apenas apresenta uma rotação segundo o eixo y; quando o ciclo de carga é positivo este apresenta uma rotação de cerca de 0,6 graus. Já no sentido negativo apresenta uma rotação de 0,7 graus.

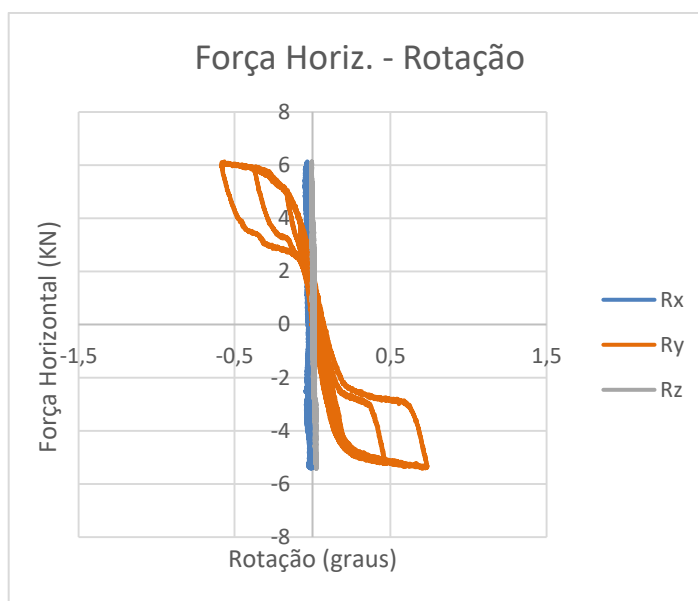


Figura 111 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional- Rotação do Frechal Superior da Parede 2 com revestimento

Estudando o levantamento das tábuas verticais na zona do frechal inferior, Figura 112, vemos que existe uma grande diferença no valor do levantamento que está de acordo com o posicionamento da tábua diagonal. Assim quando a tábua diagonal não é solicitada à compressão a parede apresenta um levantamento de 7,5mm para uma força de cerca de 6KN. Já quando a força atua no sentido negativo, a tábua diagonal é solicitada, aumentando assim consideravelmente o valor do levantamento da tábua, passando este para 8,6mm para um força menor de 5,5KN. Esta diminuição de força e aumento de deslocamento demonstra o incremento de rigidez que a tábua diagonal confere à parede.

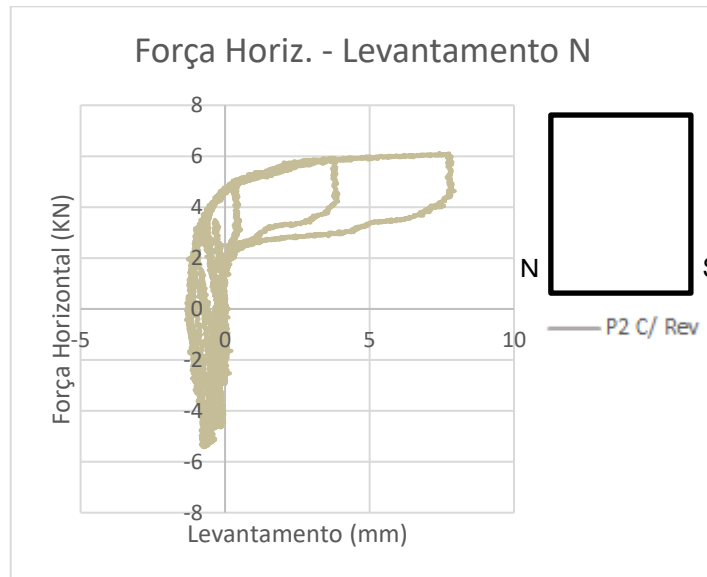


Figura 112 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 na parte Norte

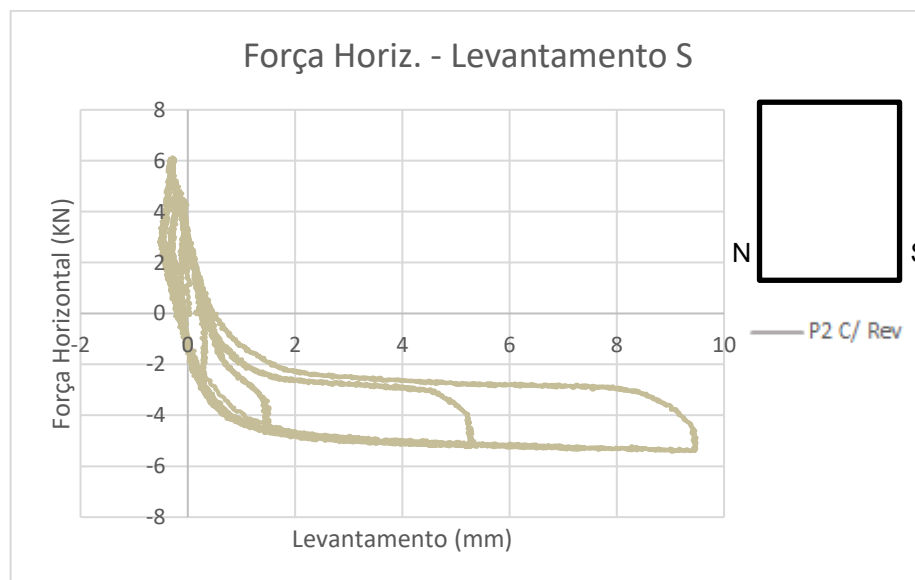


Figura 113 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 na parte Sul

Analisando agora o comportamento da parede através do deslocamento das diagonais, Figura 114, verificamos que ambos os ciclos de carga, positivo e negativo, apresentam o mesmo deslocamento, sendo que a parede apresenta um movimento de distorção em ambos os sentidos.

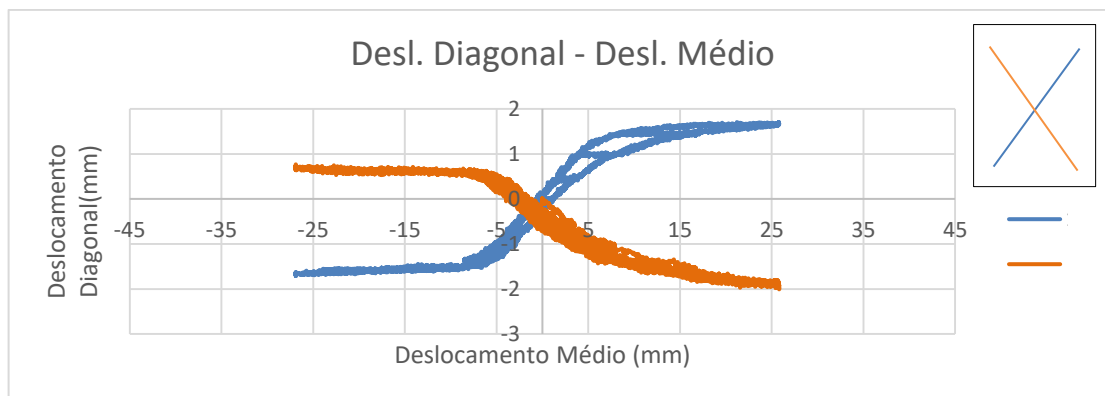


Figura 114 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 2 com revestimento, carregamento bidirecional

5.5.2.2. Sem Revestimento

Analisando a Figura 115 verificamos que no sentido positivo de incremento de força, a parede apresenta um valor máximo de força de corte de cerca de 5KN e um deslocamento de 35mm. Já quando se aplica a força no sentido negativo, esta apresenta um valor máximo de cerca de 4,8KN e um deslocamento de 24mm. Podemos assim, através da diferença de valores deslocamentos para a mesma força, verificar a influência da tábua diagonal no comportamento da parede, sendo que para a mesma força esta apresenta um deslocamento menor, o que comprova um aumento da rigidez nesta direção de carregamento.

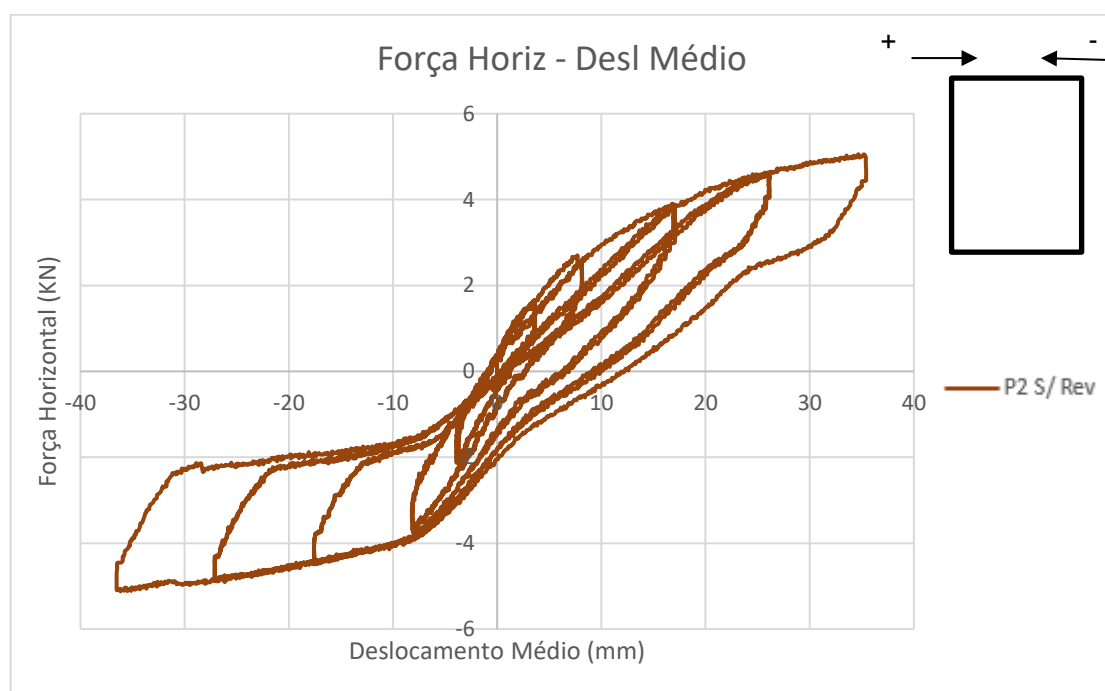


Figura 115 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 S/ Revestimento

São apresentados na Tabela 17 os valores de rigidez obtidos através do gráfico da Figura 115 para a parede 2 ensaiada sem reboco e para o último ciclo de carga bidirecional.

Tabela 17 – Valores da Rigidez da Parede 2 S/ Revestimento para ensaio bidirecional

P2 S/ Revest			
	Positivo	Negativo	
	K	K	
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,20	0,25
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,18	0,22
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,105	0,022
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,47	0,44

Com a análise da rotação do frechal superior, Figura 116, verificamos que apenas apresenta uma rotação significativa quando é sujeito ao ciclo de carga negativo, sendo este o ciclo em que a tábuas diagonal é solicitada à compressão pela força. Para este ciclo o frechal apresenta uma rotação segundo o eixo x de cerca de 0,3 graus e sobre o eixo y de cerca de 1,2 graus.

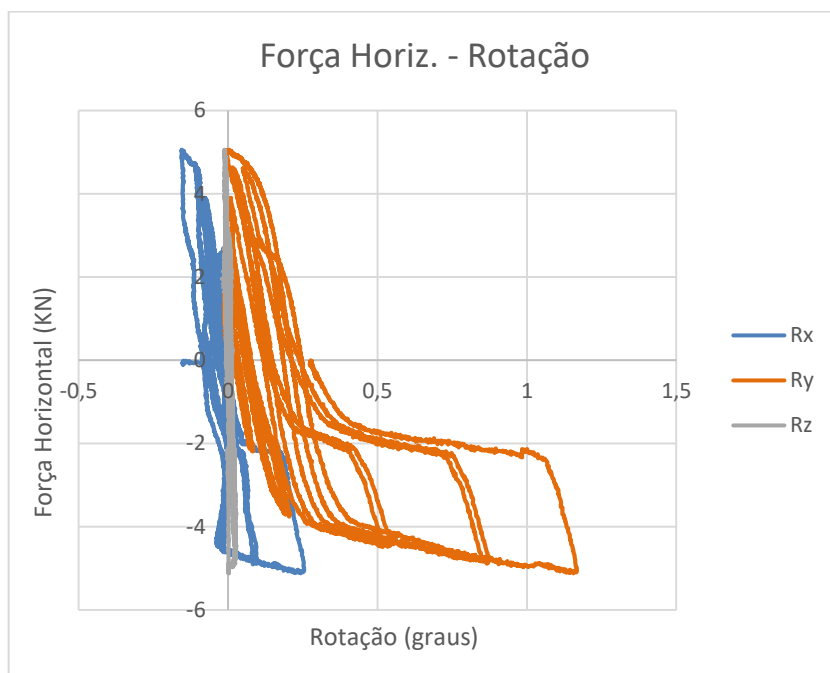


Figura 116 – Gráfico Força Horizontal Bidirecional- Rotação do Frechal Superior da Parede 2 S/ Revestimento

No que toca ao levantamento das tábuas na ligação ao frechal, podemos verificar o levantamento quando a força é aplicada no sentido positivo na extremidade da parede onde a força é aplicada, Figura 117, sendo o valor deste levantamento de cerca de 3,5mm para uma força máxima de 5KN. Quanto ao levantamento da extremidade direita da parede, onde força é aplicada no sentido negativo solicitando a tábua diagonal, a Figura 118 ilustra deslocamentos nos dois sentidos de carga. Como apenas se espera que ocorra levantamento quando a força atua no sentido negativo, o deslocamento negativo verificado pode ser justificado pela distorção da parede quando a carga atua neste sentido.

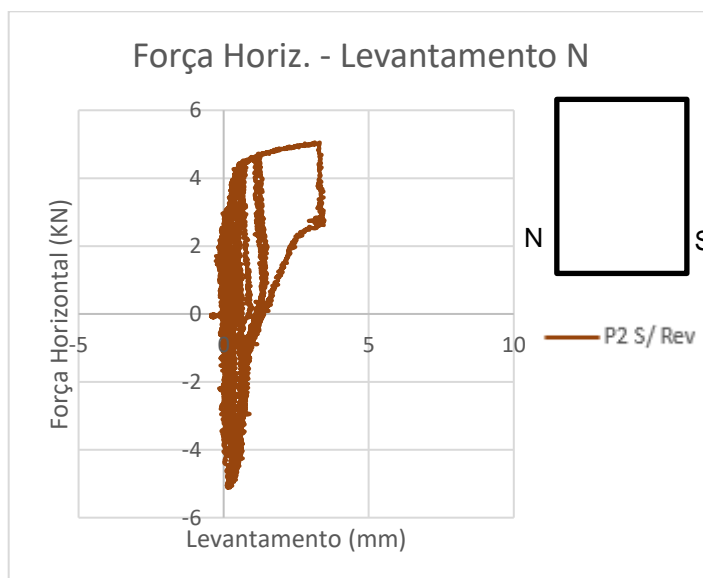


Figura 117 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da parede 2 S/ Revestimento na parte Norte

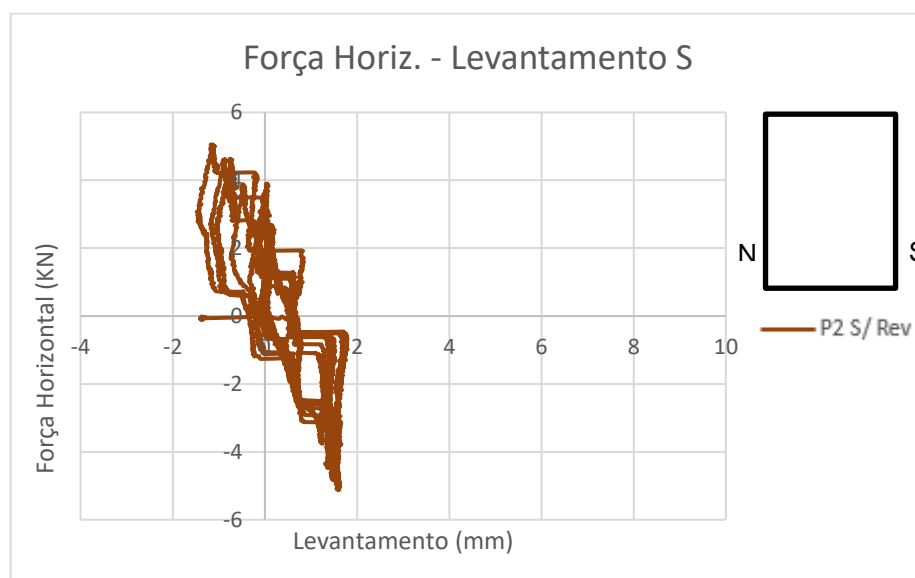


Figura 118 - Gráfico Força Horizontal Bidirecional – Levantamento da parte inferior da Parede 2 S/ Revestimento na parte Sul

Estudando o comportamento da parede pelo estudo do deslocamento das diagonais, Figura 119, verificamos que, quando o ciclo de carga é positivo, ambas apresentam valores de deslocamento idênticos, o que demonstra uma distorção da parede. Já quando o deslocamento ocorre no sentido negativo não existe qualquer tipo de deslocamento das diagonais, o que ilustra um comportamento perfeito como corpo

rígido através da solicitação da tábua diagonal, ou seja indica-nos que ocorre a rotação da parede sobre o ponto da base onde é fixada a tábua diagonal.

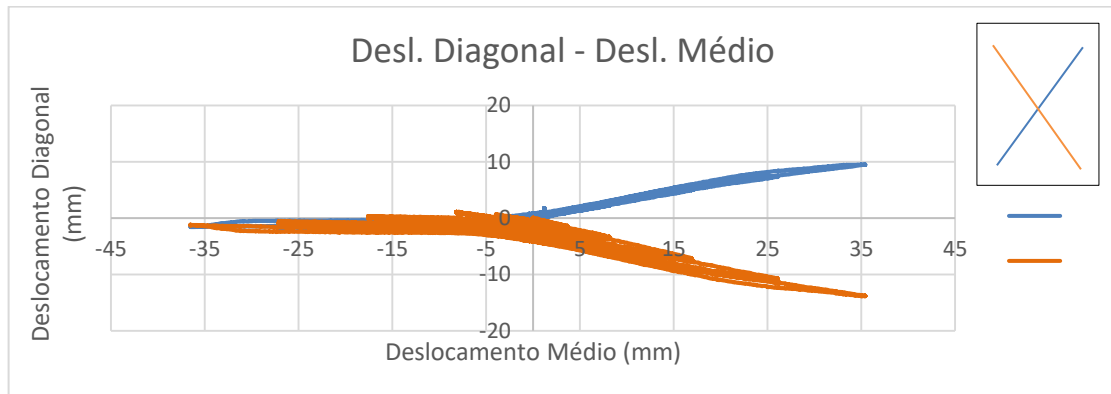


Figura 119 - Gráfico Deslocamento Diagonal – Deslocamento Médio da Parede 2 S/ Revestimento, carregamento bidirecional

5.5.2.3. Comparação do comportamento da Parede 2 com e sem revestimento

Comparando agora os gráficos desta fase com os da fase 2, Figura 120, verificamos que o comportamento da parede na fase 2 corresponde ao comportamento da parede quando é ensaiada nesta fase com o reboco, o que confirma a conformidade dos ensaios. Comparando agora os dois gráficos desta fase, verificamos que o revestimento garante uma maior rigidez à parede, uma maior capacidade resistente, atingindo uma força de cerca de 6 kN, enquanto sem o reboco esta apenas atinge os 5 kN. A ausência do reboco, por sua vez, permite a parede ter um comportamento mais flexível e com isto alcançar deslocamentos maiores quando comparada com a parede rebocada.

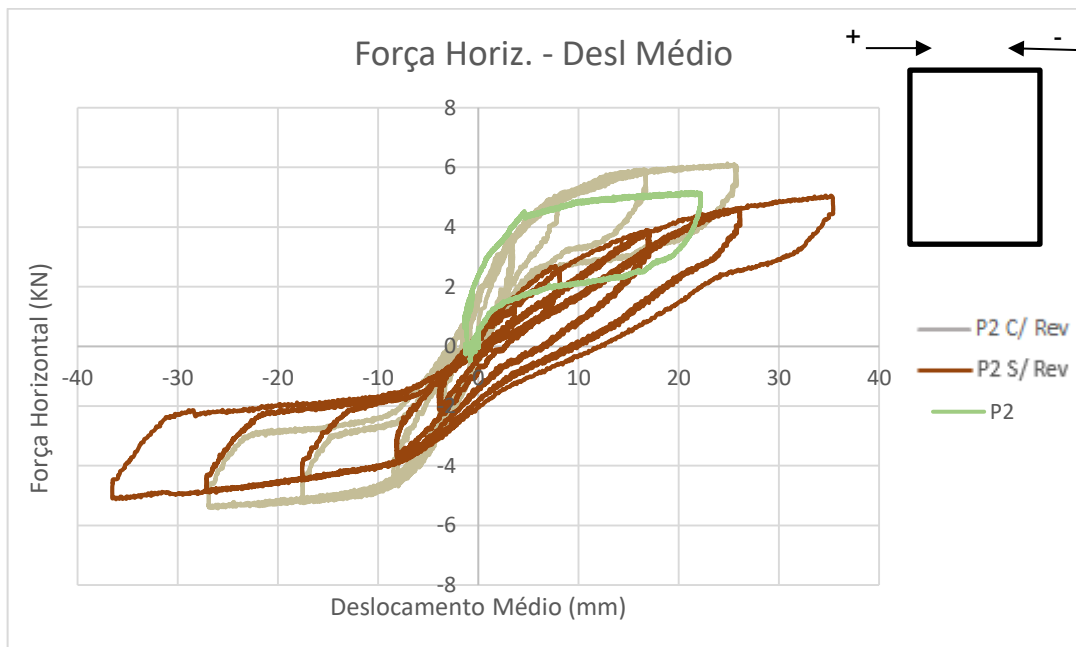


Figura 120 - Gráfico Força Horizontal Unidirecional e Bidirecional – Deslocamento Médio, da Parede 2 Com e Sem Revestimento

São apresentados ainda na Tabela 18 os valores da rigidez obtidos a partir dos gráficos de ensaio de todos os ensaios realizados ao corte para a parede 2. Porém, nos ensaios com vários ciclos, apenas estão apresentados os valores que correspondem ao último ciclo de carga.

Tabela 18 – Valores da rigidez da Parede 2 para todas as fases de ensaio e para o último ciclo de deslocamento

		P2	P2 C/ Revest.		P2 S/ Revest	
			Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
		K	K	K	K	K
Elástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,57	0,57	0,64	0,2	0,25
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,52	0,41	0,35	0,18	0,22
Plástico	Rigidez carga (KN/mm)	0,03	0,15	0,03	0,10	0,02
	Rigidez descarga (KN/mm)	0,31	0,42	0,88	0,47	0,44

6 MODELAÇÃO NUMÉRICA

6.1. INTRODUÇÃO

Concluída a fase experimental, foram modeladas numericamente, através do programa de cálculo automático SAP2000, duas das paredes em estudo: a parede 1 correspondente a uma parede só com tábuas verticais e a parede 2 correspondente a uma parede com uma tábua diagonal.

Esta modelação teve como objetivo comparar a carga crítica de encurvadura do modelo com a carga crítica resultante do ensaio e com o valor teórico, aferindo a coerência entre os diferentes valores.

Para cada parede foram ainda construídos 3 modelos distintos: um sem qualquer tipo de reboco, o segundo com reboco em apenas uma das faces da parede e um último com reboco nas duas faces.

Através dos modelos, foi avaliado o efeito do reboco na rigidez das paredes e de que forma este contribui para o aumento da carga crítica de encurvadura.

Para a parede com a tábua diagonal, foi ainda alterada a ligação das tábuas verticais com a diagonal de rígida para rotulada, para avaliar que contributo estas ligações têm para o comportamento real da parede.

6.2. CONCEÇÃO DO MODELO

O modelo foi construído com elementos de barra para simular as tábuas verticais, horizontais, os fasquios e os pregos de ligação dos fasquios às tábuas. Para simular o reboco foram utilizados elementos de casca aplicados nas faces da parede.

6.2.1. MATERIAIS

Quanto à definição dos materiais, considerou-se que as propriedades mecânicas e físicas correspondiam às da madeira de pinho de classe C18 apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional

E_{mean} (GPa)	G_{mean} (GPa)	ρ_{mean} (Kg/m ³)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$f_{t,0,k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa)
9	0,56	380	18	11	2	18

Os pregos, utilizados nas ligações dos fasquios às tábuas constituintes de estrutura apresentam as propriedades da Tabela 20.

Tabela 20 - Propriedades mecânicas dos pregos em aço

E (GPa)	ν	Pmean (kg/m ³)
199	0,3	76,97

6.2.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos foram simulados utilizando as dimensões médias de cada parede, nomeadamente o espaçamento entre tábuas, a largura e a espessura tanto das tábuas verticais como das ripas horizontais (fasquios).

6.2.2.1. Modelo de parede de tabique só com tábuas verticais (P1)

Esta parede tem uma altura de 2,43m e uma largura total de 1,12m. As dimensões e o número de elementos desta parede são apresentados nas Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 21 – Elementos verticais da Parede 1

Elementos Verticais P1		
Número de alinhamentos	Largura (cm)	Espessura (cm)
5	16,65	4,19

Tabela 22 – Ripas horizontais da Parede 1

Elementos Horizontais (fasquios) P1		
Número de alinhamentos	Largura (cm)	Espessura (cm)
30	3,42	1,16

Tabela 23 - Frechais

Frechal		
Número	Largura	Espessura
2	8 cm	8cm

6.2.2.2. Modelo de parede de tabique com tábua diagonal (P2)

A parede P2 tem uma altura de 2,43m e uma largura total de 1,15m. As dimensões e o número de elementos desta parede são apresentados na Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26.

A tábua diagonal presente neste modelo apresenta a mesma secção transversal das tábuas verticais.

Tabela 24 - Elementos verticais da Parede 2

Elementos verticais P2		
Número de tábuas	Largura (cm)	Espes-sura (cm)
6	16	4,68

Tabela 25 - Elementos horizontais da Parede 2

Elementos horizontais (fasquios) P2		
Número de tábuas	Largura (cm)	Espes-sura (cm)
30	3,75	0,61

Tabela 26 - Frechais

Frechal		
Número	Largura (cm)	Espes-sura (cm)
2	8	8

6.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

De forma a validar a veracidade do modelo numérico foi comparado o seu valor de carga crítica com o valor teórico.

6.3.1. CARGA CRÍTICA TEÓRICA

6.3.1.1. Conceito de Carga Crítica

O conceito de carga crítica é estudado no âmbito da estabilidade. A estabilidade das estruturas é a capacidade que estas apresentam de resistir a certo carregamento sem que se verifique uma alteração importante na sua configuração [13].

A instabilidade só existe quando na estrutura se instalam tensões de compressão. Por forma a avaliar este problema, consideremos uma estrutura sujeita a uma força de compressão P . Quando carregada, a estrutura voltará à sua forma inicial se a força P não for superior a um certo valor de P_{cr} (valor de carga crítica), carga para qual a estrutura entra em rotura por deformação crescente no tempo. Assim, podemos afirmar que quando $P < P_{cr}$ a estrutura mantém-se estável e quando $P > P_{cr}$ torna-se instável. O resultado da instabilidade das estruturas é o fenómeno da encurvadura e consiste no desvio da peça para fora do seu eixo [13].

Euler estudou estes problemas de instabilidade, determinando a carga crítica e as formas de encurvadura de uma barra linear em compressão axial, Figura 121 [13].

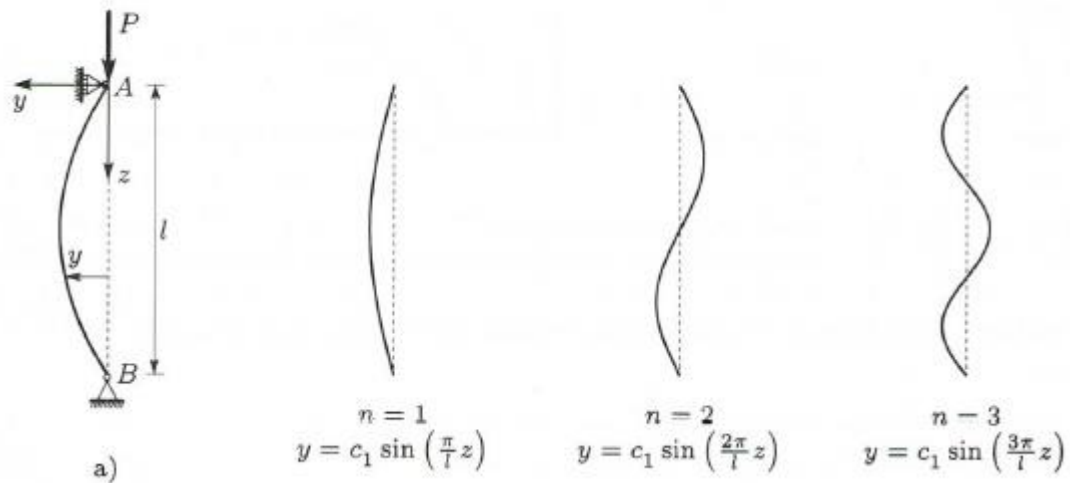


Figura 121 - Problema de Euler e formas de encurvadura [13]

O valor da carga crítica pode assim ser determinado pela expressão:

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad 2$$

n – Número inteiro de formas para as quais existe equilíbrio entre a carga vertical e os momentos fletores instalados (ver Figura 121);

E – Módulo de elasticidade da peça;

I – Momento de inércia da secção, na direção mobilizada pelo deslocamento de encurvadura;

l – Comprimento de encurvadura da peça.

A equação de cálculo de carga crítica não pode ser aplicada a paredes, visto não ser uma peça linear com uma das dimensões bastante superior às outras duas direções [13]. Porém, como demonstrado na tese de mestrado [14] pode utilizar-se a fórmula (2) para calcular a carga crítica de cada tábua vertical, sendo a carga crítica da parede o somatório das cargas críticas de cada tábua vertical.

6.3.1.2. Carga Crítica Teórica da Parede 1

Sendo calculada a carga crítica para o primeiro modo de encurvadura ($n=1$), ou seja, o modo que ocorre para o menor valor da carga crítica e fazendo uso da equação (2) sendo esta parede constituída por 5 elementos verticais temos:

Tabela 27 - Carga Crítica Teórica da Parede 1

Carga Crítica					
l (m4)	E (GPa)	l (m)	1 Tábua	Parede (KN)	Parede (KN/m)
1,021	9	2,43	15,35	76,76	68,54

6.3.1.3. Carga Crítica Teórica Parede 2

Calculando também para o primeiro modo de encurvadura a carga crítica desta parede e apresentando esta 6 elementos verticais, temos:

Tabela 28 - Carga Crítica Teórica da Parede 2

Carga Crítica					
I (m ⁴)	E (GPa)	l (m)	1 Tábua	Parede (KN)	Parede (KN/m)
1,3667	9	2,43	20,56	123,35	107,26

6.3.2. CARGA CRÍTICA DO MODELO NUMÉRICO SEM REBOCO

Foi utilizado o modelo numérico sem reboco como termo de comparação visto se ter calculado a carga teórica só para as tábuas de madeira.

6.3.2.1. Parede 1 (apenas tábuas verticais)

Para uma força distribuída de compressão de 10KN/m, o fator multiplicativo para obtenção da carga crítica de encurvadura desta parede é de 7,67 como ilustra a Figura 122.

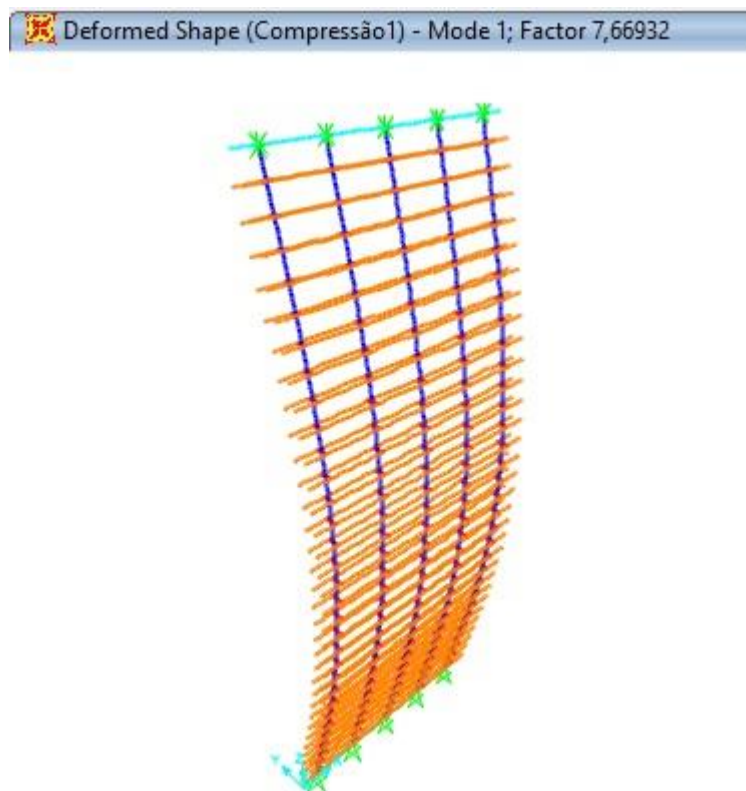


Figura 122 - Deformada da Parede 1, sem reboco, e respetivo fator de encurvadura

Este fator, quando multiplicado pela força aplicada traduz-se num valor de carga crítica à encurvadura de 76,67 KN/m.

6.3.2.2. Parede 2 (com tábua diagonal)

Para a mesma força distribuída de compressão de 10KN/m, o fator multiplicativo para obtenção da carga crítica de encurvadura desta parede é de 12,94 como ilustra a Figura 123.

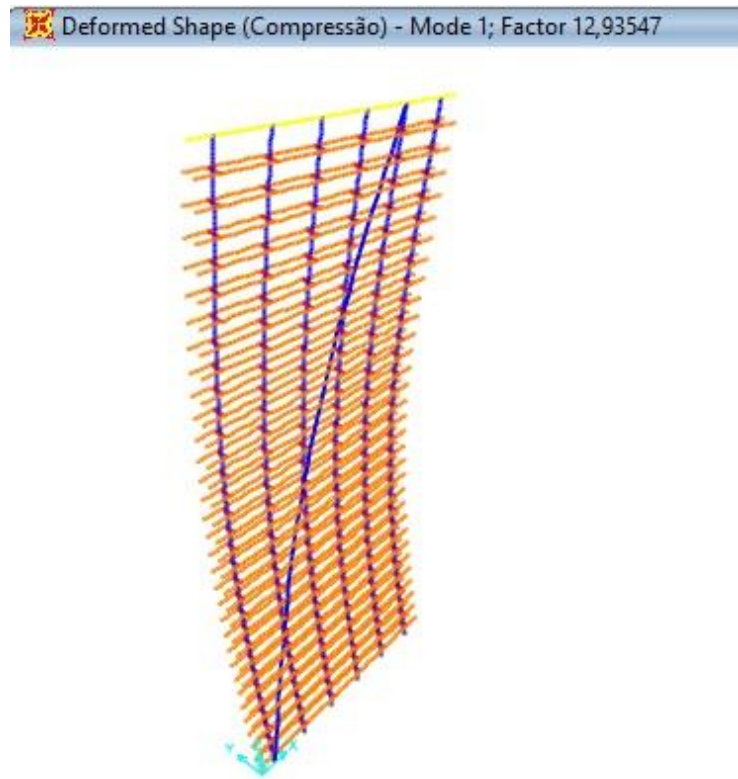


Figura 123 - Deformada da Parede 2, sem reboco, e respetivo fator de encurvadura

Este fator, quando multiplicado pela força aplicada traduz-se num valor de carga crítica à encurvadura de 129,4KN/m.

6.3.3. COMPARAÇÃO DAS CARGAS CRÍTICAS

Comparando então os valores obtidos teoricamente com os modelados, Tabela 29, podemos afirmar que o modelo está bem calibrado. Há, porem, uma diferença maior nos valores da parede 2.

Tabela 29 - Comparação dos Valores de Carga Crítica

	Valor Teórico (KN/m)	Valor Numérico (KN/m)
P1	68,5	76,6
P2	107,3	129,4

6.4. ANÁLISE NUMÉRICA À COMPRESSÃO

Tendo sido confirmada a conformidade do modelo com o valor teórico, foi então feita a análise à compressão das paredes em estudo. Pretendeu-se, como já mencionado, estudar o valor da carga crítica de cada parede e comparar o valor numérico com o valor experimental, assim como avaliar a influência do reboco na rigidez da parede.

No modelo o reboco encontra-se inserido no eixo dos fasquios (elementos horizontais) como tal, para a parede apresentar uma inércia em conformidade com a realidade foi calculada uma espessura fictícia de reboco de 3,0cm posicionada a eixo do fasquio de forma a representar uma espessura real de 1,7cm aplicada à face do fasquio.

6.4.1. PAREDE 1

Tendo já sido avaliada a carga crítica desta parede sem revestimento, 6.3.2.1, vai ser então estudado o valor da carga crítica desta quando apresenta reboco em uma e ambas as faces. Será ainda avaliada a evolução da carga crítica de encurvadura quando o reboco apresenta diferentes valores para o módulo de elasticidade.

6.4.1.1. Carga crítica do modelo numérico com reboco numa das faces

Considerando um valor de módulo de elasticidade de 1GPa para o reboco, o fator multiplicativo de carga crítica da parede 1 com reboco em uma das faces é de 8,595, como podemos ver pela Figura 124, para uma força distribuída de 10kN/m. Assim o valor de carga crítica desta parede nas condições descritas é de 86,0kN/m.

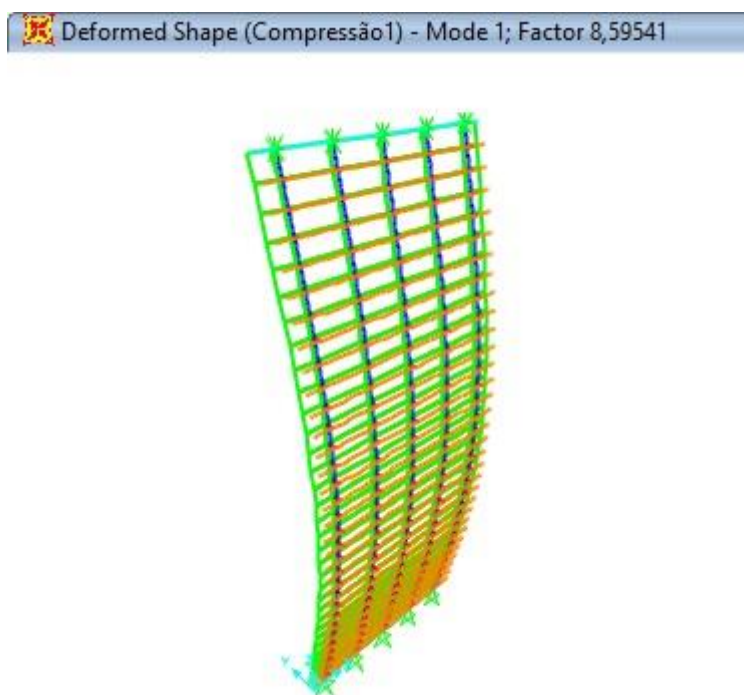


Figura 124 - Deformada da Parede 1, com reboco numa das faces

6.4.1.2. Carga crítica do modelo numérico com reboco em ambas as faces

Utilizando os mesmos critérios descritos anteriormente para o modelo da parede rebocada apenas numa das faces, o fator multiplicativo da parede com revestimento em ambas as faces é de 9,585, Figura 125, o que se traduz numa carga crítica de 95,9kN/m.

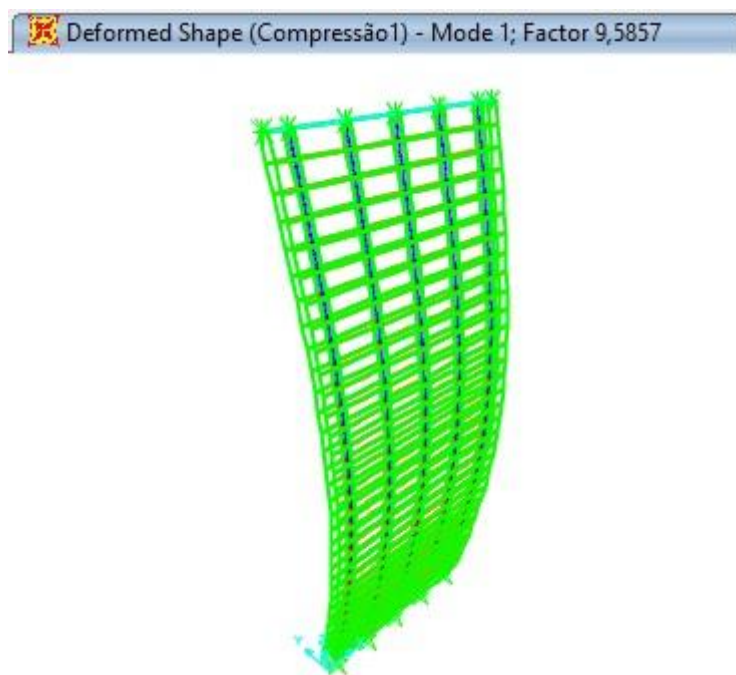


Figura 125 – Deformada da Parede 1, com reboco em ambas as faces

6.4.1.3. Variação do Módulo de Elasticidade do Reboco

Como referido, foi também estudada a alteração da carga crítica com a variação do módulo de elasticidade do reboco, Tabela 30.

Tabela 30 – Resumo da variação da carga crítica da parede 1 com o módulo de elasticidade do reboco

E_{reboco} (GPa)	Pcrit (KN/m)	
	P1R1	P1R2
0	77	77
0,5	82	88
1	86	96
3	94	113
5	98	122
7	101	128
9	103	133

6.4.1.4. Conclusões

A parede 1 é uma parede revestida em ambas as faces por um reboco cimentício, cujo módulo de elasticidade se estima inferior a 10GPa. Assim, observando então os valores obtidos nos modelos e comparando-os com o valor do ensaio experimental, aproximadamente 101KN/m, verificamos que existe conformidade e o modelo representa o comportamento real da parede.

Podemos concluir ainda que o aumento do módulo de elasticidade do reboco tem um efeito preponderante no aumento da carga crítica da parede. Assim, segundo os modelos numéricos, se a parede possuir um reboco numa das faces com um módulo de elasticidade de 9GPa, este representa um aumento de

carga crítica de aproximadamente 34% quando comparado com a parede sem reboco. Já se o mesmo reboco for aplicado em ambas as faces, temos um aumento de carga crítica de aproximadamente 77% quando comparado com a parede sem reboco.

6.4.2. PAREDE 2

Tendo já sido avaliada a carga crítica desta parede sem revestimento, 6.3.2.2, vai ser então estudado o valor da carga crítica desta quando apresenta reboco em uma e ambas as faces. Será ainda avaliada a evolução da carga crítica de encurvadura quando o reboco apresenta diferentes valores para o módulo de elasticidade.

Visto esta parede ser constituída por uma tábua diagonal, foi ainda estudado o efeito da ligação das tábuas verticais às diagonais. Tendo estas primeiramente uma ligação rígida e passando a ter uma ligação com o grau de liberdade correspondente com o prego (rotação sobre o seu eixo), tentando assim representar um comportamento mais real da parede.

6.4.2.1. Carga crítica do modelo numérico com reboco em uma das faces

Considerando um valor de módulo de elasticidade de 1GPa para o reboco, o fator multiplicativo de carga crítica da parede 2 com reboco em uma das faces e ligação rígida é de 14,0, como podemos ver pela Figura 126, , para uma força distribuída de 10KN/m. Assim o valor de carga crítica desta parede nas condições descritas é de 140KN/m. Enquanto que, para as mesmas condições e alterando apenas a ligação das tábuas, temos um fator de 12,0, Figura 127, e uma carga crítica de 120KN/m.

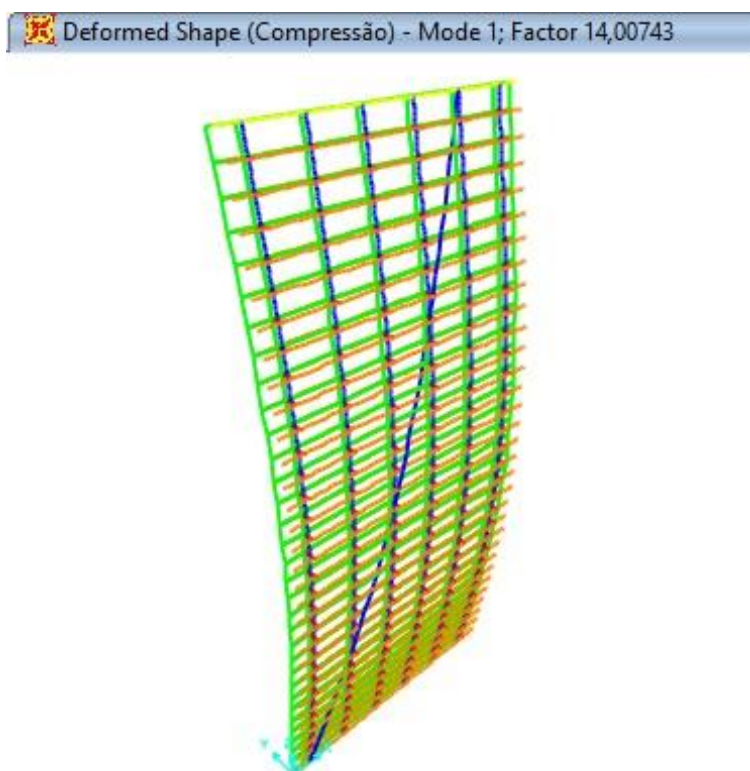


Figura 126 - Deformada da Parede 2, com reboco em uma das faces e ligação rígida

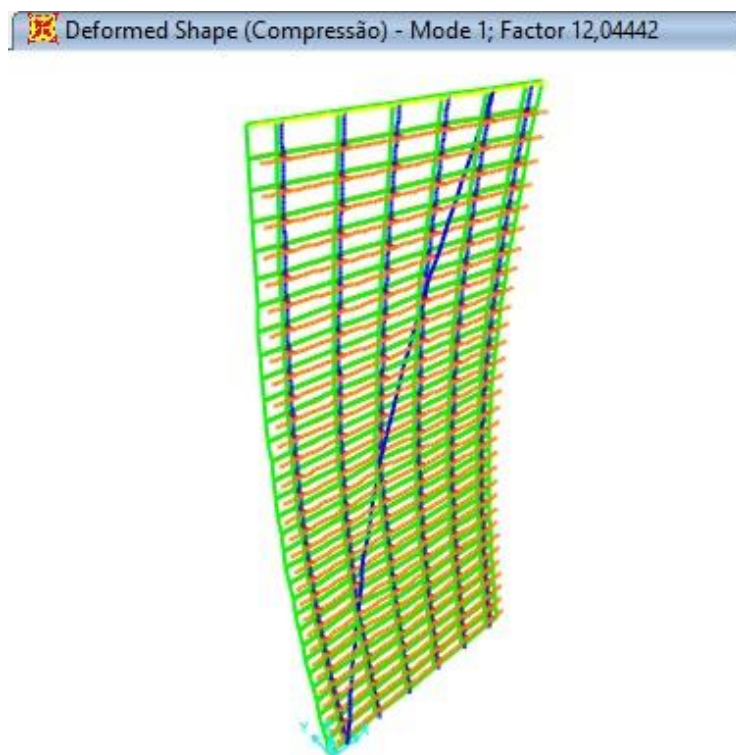


Figura 127 - Deformada da Parede 2, com reboco em uma das faces e ligação rotulada

6.4.2.2. Carga crítica do modelo numérico com reboco em ambas as faces

Utilizando os mesmos critérios descritos anteriormente para o modelo da parede rebocada em apenas uma das faces, existindo só a diferença de apresentar revestimento em ambas as faces, o fator multiplicativo desta é de 15,13, Figura 128, o que se traduz numa carga crítica de 151,3KN/m. Porém quando se altera o tipo de ligação temos um fator de 13,47, Figura 129, e uma carga crítica de 134,7KN/m.

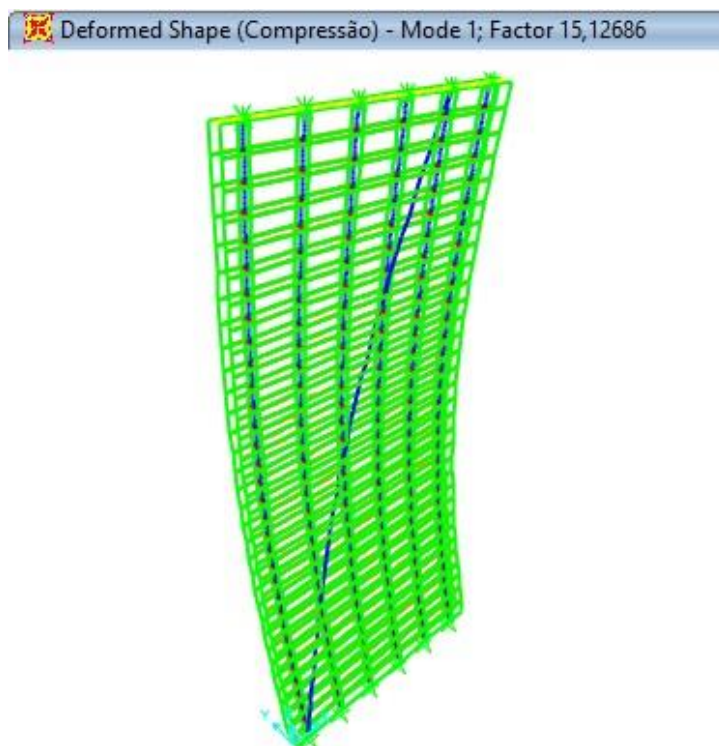


Figura 128 - Deformada da Parede 2, com reboco em ambas as faces e ligação rígida

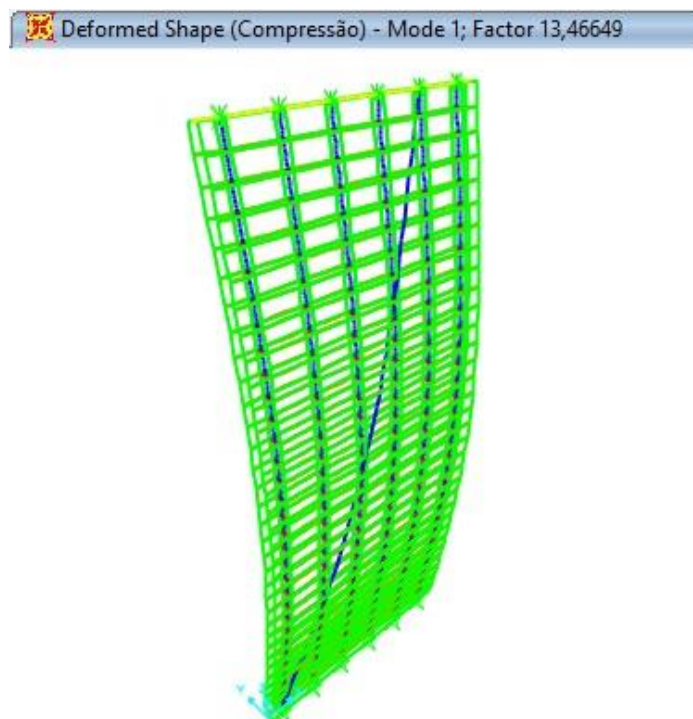


Figura 129 - Deformada da Parede 2, com reboco em ambas as faces e ligação rotulada

6.4.2.3. Evolução da carga crítica em função do módulo de elasticidade do reboco e do tipo de ligação

Como referido, foi também estudada a alteração da carga crítica com a variação do módulo de elasticidade do reboco, Tabela 31.

Tabela 31 – Resumo da variação da carga crítica da parede 2 com o módulo de elasticidade

	Ligação Rígida		Ligação Rotulada	
	P2R1	P2R2	P2R1	P2R2
E (GPa)	Pcrit (KN/m)			
0	129	129	102	102
0,5	136	143	114	124
1	140	151	120	135
3	148	168	133	156
5	152	176	139	166
7	154	182	143	173
9	157	187	146	179

6.4.2.4. Conclusões

Comparando assim o valor do ensaio experimental, 115KN/m, com os valores obtidos nos modelos numéricos, verificamos que os modelos de ligação rotulada são os que melhor representam o comportamento real da parede, tendo em conta a carga crítica apresentada. É necessário ainda ter em conta que a parede 2 é revestida numa das faces inteiramente por um reboco cimentício e na outra parcialmente por um reboco de cal e os modelos foram elaborados com reboco integral por face e o mesmo módulo de elasticidade em ambas as faces rebocadas.

Quando a ligação passa de rotulada a rígida temos um aumento de 26% na carga crítica de encurvadura, para o modelo sem reboco.

Analisando agora o efeito do reboco na variação da carga crítica podemos concluir, por observação da Figura 130, que quando existe ligação rígida o reboco não tem tanta importância no aumento da carga crítica quando comparando com a ligação rotulada, o que faz sentido dado que o reboco confere mais rigidez à estrutura e impedindo a rotação dos pregos sobre o seu eixo.

Para a parede rotulada, o reboco com um módulo de elasticidade de 9GPa confere à parede um aumento da carga crítica de cerca de 76%. Já para o mesmo tipo de ligação e reboco, mas estando este apenas numa das faces da parede, este confere um aumento de carga crítica de 43%.

Quando a ligação é rígida e para a parede revestida em ambas as faces, com um reboco com módulo de elasticidade de 9GPa, verificamos um aumento de carga crítica de 45%. Quando este está presente em apenas uma das faces o seu incremento de carga crítica é de 22%.

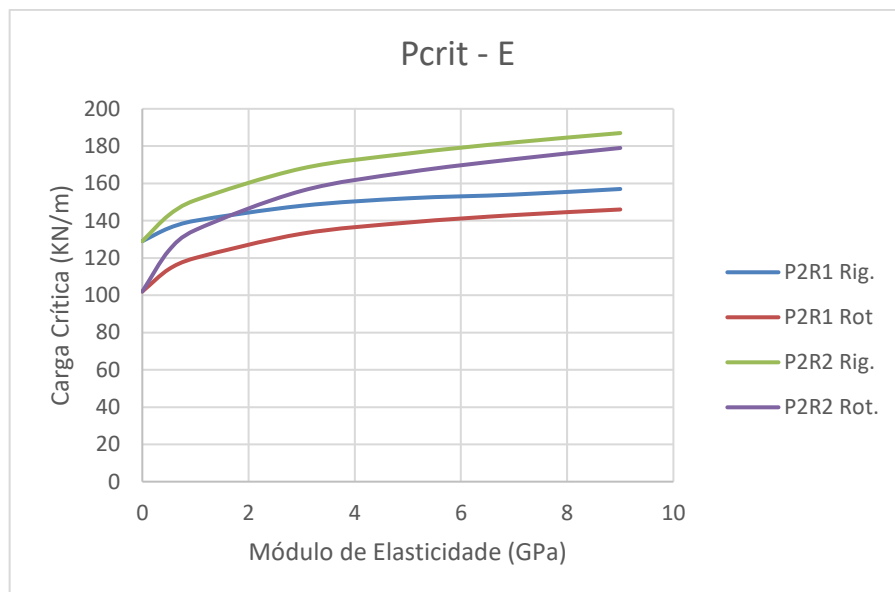


Figura 130 - Variação da carga critica em função do aumento do módulo de elasticidade para as várias disposições da parede 2

Podemos concluir então que o reboco tem um grande contributo para o aumento da carga critica das paredes.

6.5. ANÁLISE NUMÉRICA AO CORTE

Foi ainda feita a análise dos modelos de ambas as paredes, sem os revestimentos, para uma força horizontal de corte de 4kN de forma a avaliar o comportamento do modelo ao corte, que rigidez apresenta, e de que forma é comparável com os dados experimentais.

6.5.1. PAREDE 1

Observando os dados retirados do modelo numérico presentes na Figura 131, vemos que a parede 1 apresenta um deslocamento de 9,7mm para a força de aplicada de 4kN o que resulta numa rigidez de cerca de 0,41kN/mm.

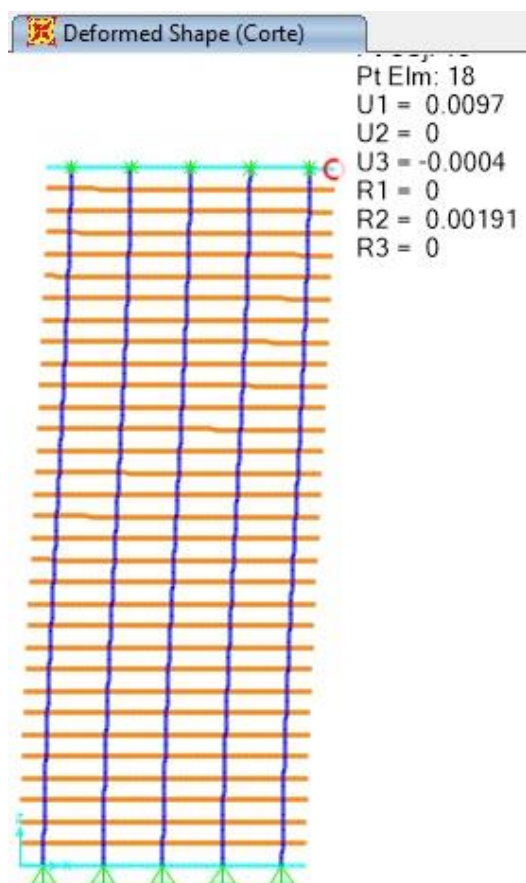


Figura 131 – Modelo da deformada da Parede 1 e respectivos deslocamentos para a força de corte

6.5.2. PAREDE 2

Observando os dados retirados do modelo numérico presentes na Figura 132 , vemos que a parede 2 apresenta um deslocamento de 2mm para a força de aplicada de 4KN o que resulta numa rigidez de cerca de 2KN/mm.

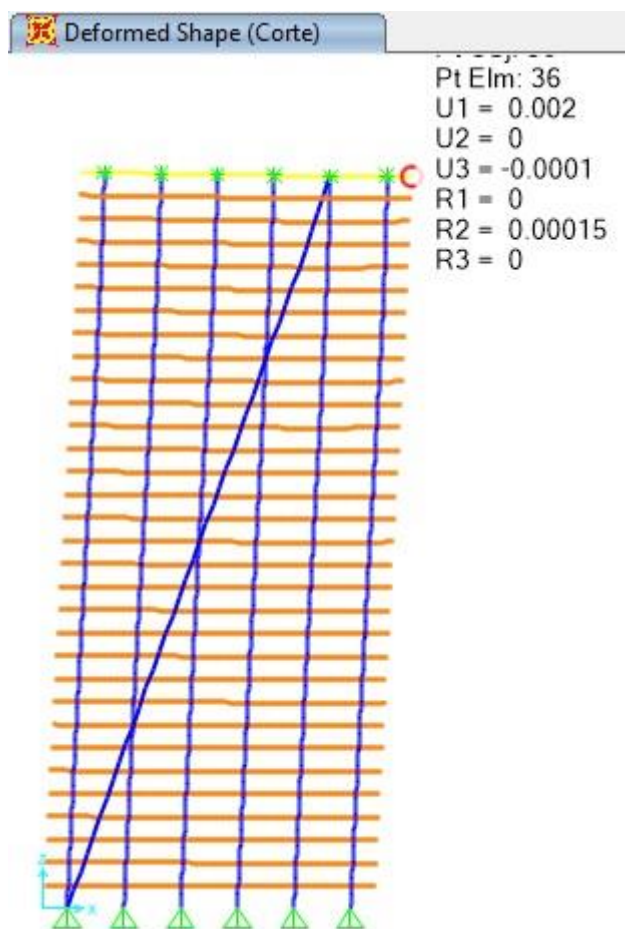


Figura 132 – Modelo da deformada da Parede 2 e respectivos deslocamentos para a força de corte

6.5.3. COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES

Comparando agora os valores obtidos nos modelos com os valores experimentais, Tabela 32 verificamos que estes são bastante distintos; ao contrário do expectável, tanto a parede 1 como a parede 2 foram ensaiadas rebocadas e apresentam valores experimentais de rigidez inferiores aos obtidos nos modelos numéricos. Estes resultados permitem concluir que os modelos nas condições de simulação adotadas não representam corretamente o comportamento destas paredes quando submetidas a forças de corte no plano.

Tabela 32 – Comparação entre os valores de rigidez dos modelos numéricos com os valores experimentais

P1		P2	
Modelo S/ Revest. (KN/mm)	Ensaio C/ Revest. (KN/mm)	Modelo S/ Revest. (KN/mm)	Ensaio C/ Revest. (KN/mm)
0,41	0,23	2,00	0,42

7

CONCLUSÃO E ÚLTIMAS CONSIDERAÇÕES

Quando se fala em paredes de tabique, fala-se de um elemento estrutural não *standard*, materializado sob diferentes formas e dimensões. Não existe muita bibliografia nem informação sobre o comportamento mecânico deste tipo de estruturas. A realização deste trabalho teve como objetivo o estudo das paredes de tabique quando submetidas a dois tipos de esforços, compressão e corte no plano da parede, de forma a dar resposta a essa carência de informação.

Um conjunto de paredes reais retiradas de edifícios de Viseu foram então sujeitas a cargas verticais de compressão uniformemente distribuídas, de forma a estudar o seu comportamento para este tipo de cargas, determinar a sua força crítica de encurvadura e observar que fatores contribuem para o aumento ou diminuição desta força, nomeadamente: a presença de revestimento, o tipo de revestimento (quando existe) e a existência na sua estrutura interna de tábuas dispostas na diagonal.

A partir dos ensaios experimentais realizados para a força de compressão, foi possível aferir valores de rigidez, de módulo de elasticidade e de carga crítica para as condições iniciais das paredes (rebocadas); não foi possível ensaiar, a tempo de finalizar esta tese, estas mesmas paredes sem o revestimento. Porém, recorrendo a modelos numéricos calibrados para os valores das cargas críticas de encurvadura, foi feita uma análise numérica do efeito do reboco nas paredes. Esta análise demonstrou que a presença do reboco, tanto numa das faces, como em ambas as faces, aumenta bastante a carga crítica da parede e, por consequência, a sua capacidade resistente. Foi ainda alterado numericamente o módulo de elasticidade do reboco, de forma a observar o seu contributo para a carga crítica de encurvadura, o que levou à conclusão de que este tem uma grande influência na alteração dessa mesma carga.

Para as paredes com tábuas diagonais foi estudada ainda, numericamente, a influência do tipo de ligações das tábuas verticais à tabua diagonal: rígida ou rotulada. Com esta análise, concluiu-se que a ligação rotulada baixa bastante a carga crítica de encurvadura. Porém, quando a ligação é rotulada e a parede é revestida por um reboco resistente, esta diferença desaparece, sendo que o reboco confere à parede um comportamento mais uniforme.

Em relação aos ensaios de força horizontal de corte no plano da parede, conclui-se que as paredes com tabua diagonal segundo a diagonal de compressão apresentam uma maior capacidade resistente comparativamente à das paredes só com tábuas verticais, ou com a tabua diagonal disposta segundo a diagonal de tração. De qualquer forma, as paredes com a diagonal resistem mais do que as paredes que apresentam apenas tábuas verticais. A tabua diagonal promove um comportamento da parede mais próximo de um comportamento de corpo rígido, impondo o levantamento das tábuas verticais na ligação ao frechal inferior. Nos casos em que não existe tabua diagonal, as paredes tendem a apresentar movimentos de distorção puros.

Olhando agora para o efeito do reboco, verificamos que este garante à parede um movimento mais uniforme, quer sejam solicitadas as tábuas diagonais quer não. O reboco garante ainda uma maior rigidez ao corte no plano da parede, fazendo-a resistir a forças mais elevadas; porém, com menores deslocamentos. De facto, quando a parede não é rebocada, tem um comportamento mais dúctil, visto ser só a madeira a trabalhar, atingindo maiores deslocamentos. Por outro lado, o estudo da parede reforçada com a cantoneira na base permitiu verificar que esta impede, na totalidade, o levantamento das tábuas na ligação com o frechal inferior, aumentando a sua rigidez horizontal. A cantoneira permitiu aumentar ainda a carga crítica da parede em relação à situação não reforçada, pelo que podemos concluir que este tipo de reforço tem importância no melhoramento do comportamento da parede.

Foram também calculadas para estas paredes e para todos os ensaios realizados os respetivos valores da rigidez de corte. No entanto, quando impostos nos modelos numéricos (calibrados para as ações verticais) as ações horizontais de corte correspondentes às experimentais, verificou-se não apresentarem valores coerentes, obrigando a novas calibrações, mas que não foi possível efetuar no âmbito desta tese.

Em suma, este trabalho permitiu concluir que as paredes de tabique, apesar de antigas, e por isso construídas sem o controlo nem conhecimento dos materiais e do comportamento estrutural que existe nos dias de hoje, têm um bom comportamento e capacidade resistente a forças verticais e horizontais no seu plano. Por outro lado, com as devidas intervenções e medidas de reforço, estes elementos estruturais podem ainda melhorar o seu comportamento face aos esforços a que eventualmente estão, ou poderão vir a estar sujeitos no futuro.

Quanto a sugestões para trabalhos futuros, sugere-se que continuem a ser avaliadas mais paredes de tabique, com o objetivo de obter valores médios mais representativos deste tipo de estruturas. As mesmas paredes devem também ser ensaiadas à compressão sem reboco, de modo a confirmar os valores obtidos no modelo numérico. Ensaiar as paredes só com tábuas verticais a ensaios de carregamento horizontal bidirecional, com e sem reboco, seria também importante, uma vez que permitiria perceber o efeito do reboco no comportamento destas paredes. Sugere-se, ainda, que se tente reforçar as paredes com através da utilização de rebocos mais compatíveis com a madeira (que não rebocos de cimento com redes metálicos, tal como existiam nas paredes ensaiadas, resultado de intervenções anteriores ao seu desmonte) e perceber o efeito dessas soluções no comportamento da parede.

BIBLIOGRAFIA

1. ICOMOS, *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*. 2004.
2. Martins, T.F.R.M., *Dimensionamento de Estruturas em Madeira-Coberturas e Pavimentos*. 2010, IST.
3. Lauriola, M.P., *Dispense del Corso - Costruzioni in Legno*. 2015, UniFi.
4. Costa, A., *Apontamentos ESMAL - Inspeção de Estruturas de Madeira e Alvenaria*. 2014, ISEP.
5. Costa, A., *Apontamentos ESMAL - Inspeção de Estruturas de Madeira e Alvenaria - Danos em estruturas de madeira*. 2014, ISEP.
6. Pinto, J., et al., *Caracterização de paredes tradicionais de tabique*. Paredes divisórias: passado, presente e futuro, 2011.
7. Cardoso, R.J.S., *Caracterização da construção em tabique de Lamego e Alto Douro*. 2013, UTAD.
8. Pinto, R.N., *Caracterização das paredes de tabique do centro histórico de Viseu*. 2013, IPV-ESTGV.
9. Fernandes, C.R., *Avaliação experimental do comportamento mecânico de paredes de tabique*. 2016, IPV-ESTGV.
10. de Almeida Ferreira, N.M., *Caracterização Mecânica Experimental de Paredes Tradicionais de Tabique*. 2016, FEUP.
11. Pires, A.M.C., *Análise de paredes de tabique e de medidas de reforço estrutural; estudo numérico*. 2013, FEUP.
12. Amorim, O.M.A., *Avaliação Experimental do Comportamento de Paredes de Tabique ao Corte no Plano*. 2016, FEUP.
13. da Silva, V.D., *Mecânica e resistência dos materiais*. 2004: Zuari.
14. Rebelo, A.F., *Avaliação das características mecânicas de paredes de tabique à compressão no plano*. 2015, FEUP.